EL

MUNDO FISICO

ESTABLECIMIENTO TIPOGRÁFICO-EDITORIAL
BARCELONA

EL MUNDO FISICO

POR

AMADEO GUILLEMIN

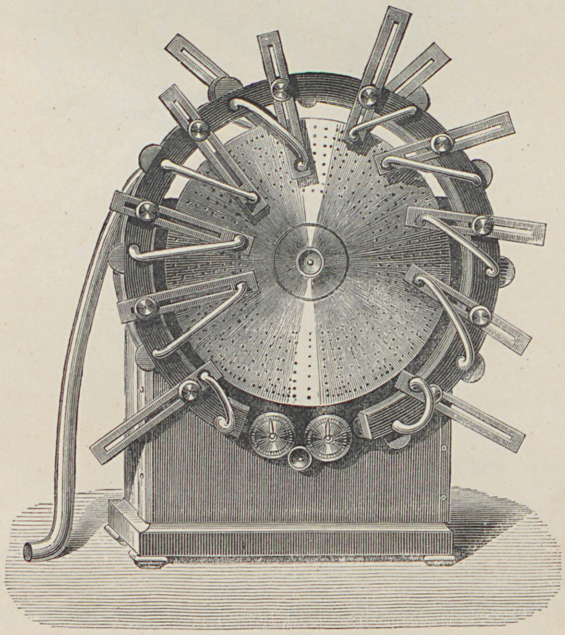
Traduccion de

D. MANUEL ARANDA Y SANJUAN

GRAVEDAD, GRAVITACION, LUZ, CALOR, ELECTRICIDAD, MAGNETISMO, ETC.

ILUSTRACION COMPUESTA DE NUMEROSAS VIÑETAS INTERCALADAS EN EL TEXTO

TOMO PRIMERO



BARCELONA

MONTANER Y SIMON, EDITORES

CALLE DE ARAGON, NUMS. 309-311

1882

EL MUNDO FISICO

LA GRAVEDAD Y LA GRAVITACION UNIVERSAL



ARQUÍMEDES

PRIMERA PARTE

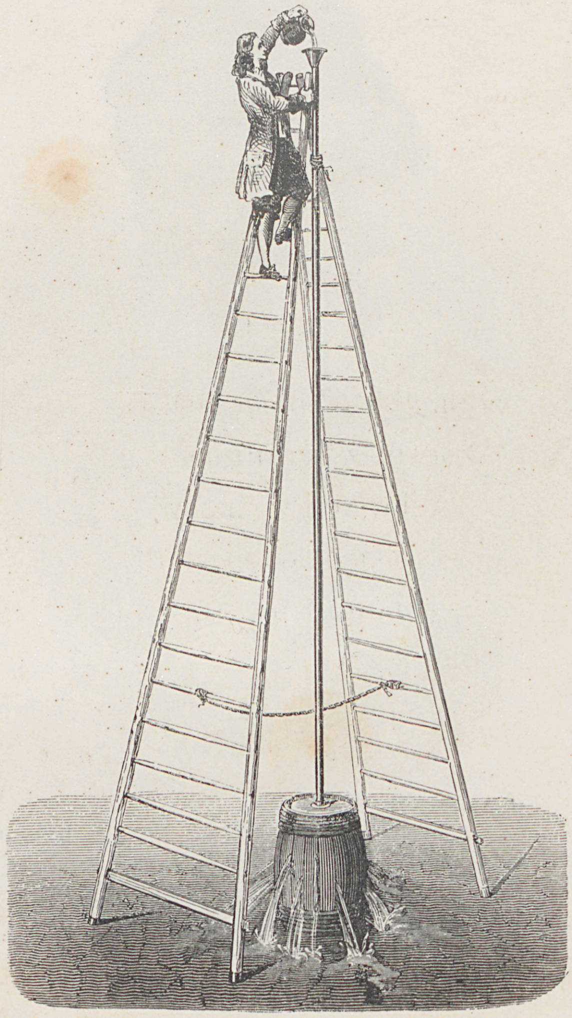
LOS FENÓMENOS Y SUS LEYES

Cada una de las fuerzas físicas cuya diferente accion en el mundo nos proponemos describir, puede ser considerada, como lo será en esta obra, bajo dos puntos de vista. Empezaremos por enumerar y exponer los fenómenos, por describir los procedimientos de observacion ó de experimentacion merced á los cuales se han descubierto sus leyes; y esta primera parte formará el lado exclusivamente científico del MUNDO FISICO. Pero hay otro, por demás importante en la época que alcanzamos para que lo descuidemos ó lo pasemos en silencio: el de las innumerables aplicaciones que el hombre ha sabido dar á las conquistas de su inteligencia. Estas aplicaciones lo abarcan todo: la ciencia en sí, cuyo poder acrecientan indefinidamente, proporcionándole nuevos medios de investigar; las artes y la industria, en la infinita variedad de sus productos útiles ó preciosos. Las aplicaciones formarán, pues, la segunda parte de cada estudio especial, el apéndice, el corolario obligado de la primera. Hemos creido preferible

separar ambas partes, pues de reunirlas nos hubiéramos expuesto á romper á cada paso la ilacion de las ideas y de las deducciones, así como á perder de vista el enlace que deben guardar entre sí los experimentos.

Así pues, á la primera parte de la GRAVEDAD Y LA GRAVITACION UNIVERSAL, que titulamos *Los fenómenos y sus leyes*, seguirá la segunda, ó sea las *Aplicaciones de la gravedad.*

Dicho esto, entremos en materia.





GALILEO

LIBRO PRIMERO.—LA GRAVEDAD

CAPITULO PRIMERO

NOCIONES PRELIMINARES SOBRE LAS PROPIEDADES GENERALES DE LOS CUERPOS

Antes de entrar de lleno en el estudio de los fenómenos propios de la Gravedad, cúmplenos ocupar la atencion del lector con algunas nociones preliminares, indispensables para la completa inteligencia de las leyes físicas. Cuando hayamos expuesto todo el conjunto de dichas leyes, será interesante recordar estas nociones generales y mostrar qué interpretacion pueden recibir de la combinacion de las fuerzas cuya incesante manifestacion son los fenómenos físicos.

Ya en este primer Libro, en que entra en accion la fuerza de gravedad, tendremos ocasion de aprovechar esas nociones preliminares y de completarlas al propio tiempo en puntos importantes.

I

LO QUE DEBE ENTENDERSE POR FENÓMENOS FÍSICOS.—DISTINCION ENTRE LA FÍSICA Y LA QUÍMICA

Todos los cuerpos de la naturaleza, cualesquiera que sean las apariencias bajo las cuales se presenten á nuestros sentidos, y ya pertenezcan á los séres organizados ó bien á la materia inorgánica, están dotados de propiedades múltiples, cuyo estudio es objeto peculiar de la física general,

Todos los cuerpos son pesados, y en virtud de su gravedad ó peso, están sujetos á variaciones que afectan su estado de movimiento ó equilibrio; todos son elásticos en mayor ó menor grado, y á causa de las vibraciones que se pueden excitar en sus masas, capaces tambien

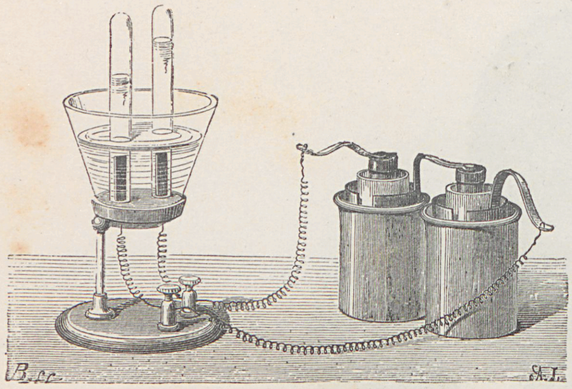


Figura 1. — Descomposicion del agua por la pila eléctrica

de producir sonidos ó ruidos; presentan además, segun las circunstancias, la forma sólida, ó líquida, ó gaseosa, pudiendo pasar un gran número de ellos por estos tres estados, cuando se les somete á la accion de un calor más ó ménos intenso. En condiciones particulares adquieren propiedades nuevas, y se tornan eléctricos ó magnéticos; al recibir la luz de un foco cualquiera, manifiestan todos ellos su presencia, ora reflejando los rayos luminosos que los hacen visibles y los coloran, ó por medio de otros fenómenos perceptibles; y cuando se calienta un gran número de ellos á una elevada temperatura, se vuelven incandescentes y entónces desempeñan las veces de focos luminosos.

Todas estas propiedades, así como las innumerables modificaciones que sufren en un mismo cuerpo, segun las circunstancias, ó que varían de un cuerpo á otro, son propiedades *físicas;* y la averiguacion de sus leyes el principal asunto de la ciencia que vamos á estudiar.

Pero antes debemos hacer una importante restriccion, una distincion necesaria entre los fenómenos que son de incumbencia de la física y los que lo son de la química. Veamos de hacer comprensible esta distincion por medio de ejemplos.

Sábese, y así nos lo enseña la química, que todos los cuerpos materiales están formados de un número limitado de sustancias simples, irreductibles, indescomponibles, á lo menos en el estado actual de la ciencia y por los medios que hoy tiene á su disposicion. La asociacion íntima ó la combinacion de estos cuerpos simples, en proporciones varias, pero definidas, es la que motiva la prodigiosa diversidad que se observa en los materiales constitutivos de todos los cuerpos, orgánicos ó inorgánicos, vivientes ó inanimados. Puestos los elementos ó sus compuestos en contacto y en condiciones físicas especiales, se trasforman, se modifican, es decir, se combinan ó se descomponen, originando así toda una serie de fenómenos cuyas leyes estudia la química. Pues bien, estos fenómenos químicos están las más de las veces ligados con fenómenos físicos de calor, luz, electricidad, etc., con los cuales no hay que confundirlos. Estúdianse en física los fenómenos generales de los cuerpos haciendo abstraccion de las alteraciones que pueden producir en la constitucion de los mismos cuerpos, ó en cuanto no sean estos los que produzcan semejantes alteraciones. En química, por el contrario, son dichas alteraciones ó cambios de naturaleza, sus leyes y el estudio de las propiedades nuevas y especiales que resultan de tales mudanzas, el objeto exclusivo de la ciencia. Por consiguiente, la diferencia bajo este

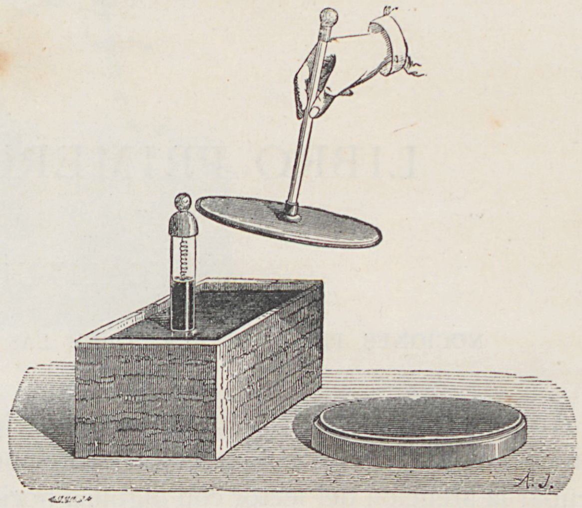


Fig. 2. — Síntesis del agua por el udiómetro

concepto es fundamental. Aclarémosla, pues, con algunos ejemplos, como acabamos de decir.

Tomemos cierta cantidad de agua. A la temperatura ordinaria, el agua es líquida. Enfriémosla á bajo 0 del termómetro; se contraerá ó reducirá de volúmen hasta que su temperatura descienda á +4 grados, luego se dilatará hasta el punto en que adquiera la forma sólida de una

masa de nieve ó de un pedazo de hielo; así, pues, á 0 grados ó bajo esta cifra, el agua toma el estado sólido. Por el contrario, si la calentamos y hacemos subir su temperatura á 100°, acabará por convertirse en vapor.

En estos tres estados físicos, muy diferentes bajo ciertos puntos de vista, ninguna de las moléculas que constituian la masa total habrá dejado de ser agua, esto es, cierta combinacion definida de dos gases, hidrógeno y oxígeno. Su constitucion física no se habrá alterado en ninguna de sus partes; todos los fenómenos que hayan podido manifestarse en estas tres formas, serán y continuarán siendo fenómenos físicos.

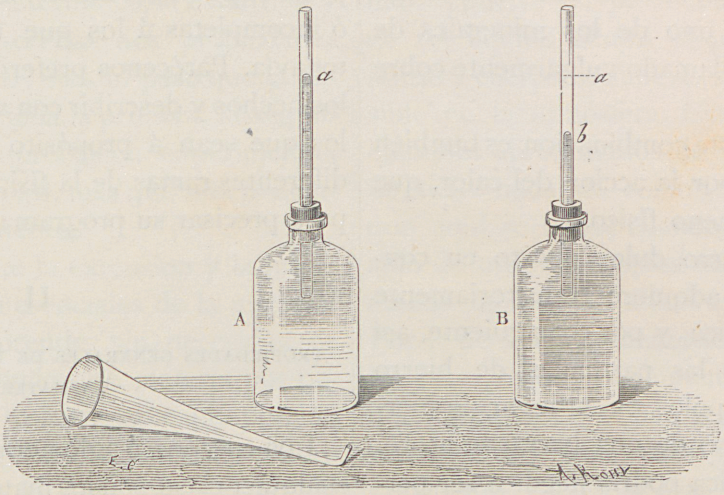


Fig. 3.—Penetracion aparente del agua y del alcohol

Supongamos ahora que la corriente de una pila atraviesa esta misma gota de agua (fig. 1). Se desprenderán burbujas de gas de su masa, dirigiéndose unas al polo positivo de la pila y otras al negativo, y si se las recoge hasta llegar á la descomposicion completa de la gota, resultarán por un lado dos volúmenes de hidrógeno, y por otro uno de oxígeno. Esta descomposicion habrá tenido indudablemente por causa un fenómeno físico, la produccion de la corriente eléctrica; pero en sí es un fenómeno de otro género, cuyo estudio corresponde á la química.

Continuemos la metamorfósis. Hagamos ahora pasar por el udiómetro el oxígeno y el hidrógeno en que se habia descompuesto la gota de agua, y en seguida lancemos una chispa eléctrica sobre la mezcla gaseosa. ¿Qué sucederá? Que los dos gases reanudarán los vínculos de su primitiva asociacion; desaparecerán en esta forma para renacer en la gotita líquida. Tambien es un fenómeno físico la descarga eléctrica que ha producido la recomposicion del agua, su síntesis, como se dice en química; pero esta última modificacion es en sí un fenómeno químico.

Si á la temperatura ordinaria se mezclan tres partes en peso de flor de azufre con ocho de limaduras de hierro ó de cobre, la masa pulverulenta no adquirirá ninguna nueva propiedad distinta de las propiedades de las partículas que la componen. Mirando dicha masa con una lente de aumento, se verán las partículas de azufre

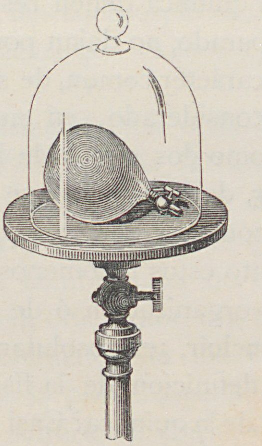


Fig. 4.—Expansibilidad y compresibilidad de los gases

perfectamente distintas de las de cobre, sin que nada impida suponer que se puede separar de nuevo mecánicamente las dos porciones de la mezcla. Pero si se pone esta en un crisol, y se somete este á la accion del calor, en breve seremos testigos del mas brillante fenómeno. Brota una luz vivísima; despréndese gran cantidad de calor, y en el fondo del crisol se encuentra una

sustancia nueva, que no tiene ya ninguna de las propiedades características del cobre ni del azufre. Esta sustancia es *sulfuro de cobre*, combinacion química definida que se halla en la naturaleza, ora pura con el nombre de covelina ó cobre azul, ora combinada con sulfuro de hierro, y formando uno de los minerales de cobre más comunes, llamado vulgarmente cobre piritoso.

El fenómeno de esta combinacion es tambien químico, originado por la accion del calor, que á su vez es un fenómeno físico.

Un pedazo de hierro dulce puesto en contacto con un iman adquiere transitoriamente la propiedad magnética, y por consiguiente, así como el iman, atrae las partículas de hierro puestas cerca de sus polos. Si en lugar de hierro dulce se hiciera uso de una barra de acero, la propiedad magnética podria llegar á ser permanente. Pero en ambos casos la constitucion del metal continuaria siendo la misma que antes de la imantacion. Este es un fenómeno puramente físico.

Fácil nos seria multiplicar estos ejemplos; pero creemos que bastan los enunciados para que se comprenda la diferencia que existe entre ambas clases de hechos, y por consiguiente la que media entre la FISICA y la QUIMICA.

Pero si la física y la química tienen respectivamente su terreno separado, no dejan por esto de participar de cierto carácter comun, de suerte que Ampère las ha considerado, en nuestro concepto con razon, como dos ramas de la FISICA GENERAL, es decir, de la ciencia que estudia las leyes de los fenómenos generales de los cuerpos, en tanto cuanto estos fenómenos sean independientes de la organizacion ó de la vida (1). Ahora, para concluir, ¿es absolutamente preciso dar aquí una definicion de la física al lado de otra definicion de la química? Casi todos los autores de tratados lo hacen al principio de sus obras, como nosotros mismos acabamos de definir la física general; pero estas fórmulas, necesariamente vagas, y que por otra parte, distan mucho de concordar, tienen poca utilidad para los que están al corriente de la ciencia y son expuestas á hacer concebir ideas inexactas ó incompletas á los que no la han estudiado todavía. Parécenos preferible abordar de frente los hechos y describir con algunos detalles todos los que sean á propósito para caracterizar las diferentes ramas de la física, y por consiguiente para precisar su programa.

(1) Y áun esta restriccion, para ser justa, debe comprenderse bien. Hay una parte de la química, y por cierto no la menos importante, que se ocupa especialmente de las combinaciones y descomposiciones propias de los cuerpos orgánicos, pero esta no es la organizacion ó la vida que preocupa al químico. Así tambien, los cuerpos vivos presentan una serie de fenómenos físicos, como calor, electricidad, etc., que les son peculiares. Estos fenómenos, considerados en sí mismos, pueden ser estudiados por el físico; pero la tarea de determinar sus relaciones con los fenómenos vitales es incumbencia de la fisiología. Las ciencias naturales abundan en semejantes afinidades, y la confusion que al parecer hay en ellas no pasa de ser aparente.

II

PROPIEDADES GENERALES DE LOS CUERPOS—¿QUÉ ES LA MATERIA?

Los cuerpos, ó aglomeraciones de materia de cualquier clase, son los materiales de la física (2). ¿Qué es, pues, la *materia?* Hé aquí una pregunta que los físicos y metafísicos de todas las épocas han debatido y comentado de mil modos, y que todavía puede dar márgen en la actualidad á las controversias más delicadas y difíciles. Nosotros haremos caso omiso de todas las sutilezas de la metafísica, y daremos el nombre de materia á todo cuanto pueda excitar una sensacion en nuestros órganos, de cualquier clase que esta sea; ó lo que es lo mismo, á todo lo que causa alguna impresion en nuestros sentidos.

Esta facultad de producir alguna sensacion corresponde á una *propiedad* de la materia, la cual posee por consiguiente tantas propiedades distintas cuantas sean las sensaciones que en nosotros puede excitar. Tenemos conocimiento de la existencia de los cuerpos y sus propiedades, merced á la vista, al tacto, al oido, al gusto y al olfato; pero es posible que ciertas propiedades nos pasen completamente desapercibidas, si no ejercen accion alguna en nuestros sentidos, ó si no podemos deducirlas de las propiedades perceptibles mediante el raciocinio ó la induccion (3).

(2) Los matemáticos estudian las propiedades de los cuerpos *geométricos*, es decir, de la extension figurada, ó de una porcion del espacio circunscrito en límites ideales. La geometría hace abstraccion de la materia, que constituye, por el contrario, los cuerpos físicos.

(3) La observacion experimental ha puesto en evidencia hace tres siglos una porcion de propiedades ántes ignoradas, porque nada habia sugerido las condiciones de su modo de presentarse; tan sólo citaremos las propiedades eléctricas y magnéticas. La ciencia descubre dia-

No tenemos idea de la materia sino en cuanto ocupa cierto lugar del espacio, es decir, en cuanto es *extension*, debiendo además ocupar este lugar con exclusion de toda otra materia, lo cual se expresa diciendo que la materia es *impenetrable*. En otros términos, la extension y la impenetrabilidad son las dos propiedades esenciales de la materia; mas, al paso que la observacion nos proporciona la primera, la segunda escapa á toda comprobacion experimental, no siendo, por decirlo así, más que una presuncion necesaria de la mente.

¿Por qué se dice que la extension y la impenetrabilidad son cosas esenciales de la materia? Desde luego se comprende, sin necesidad de explicarlo, que una porcion de materia por pequeña que sea, ocupa forzosamente una porcion del espacio que no deja de suponer algo; pero la extension por sí sola seria una abstraccion que no corresponderia á ninguna realidad perceptible. En óptica veremos que los espejos cóncavos dan, delante de su superficie, imágenes que tienen toda la apariencia exterior del objeto mismo, su extension, forma y colores. Pero estas imágenes, á pesar de ocupar una extension, no son materiales; les falta la segunda propiedad de la materia, la impenetrabilidad. No tan sólo se puede introducir la mano en ellas sin hacerlas desaparecer, sin separar las partes que las constituyen, sino que tambien es posible hacer coincidir con ellas otras imágenes análogas, colocando convenientemente otro ú otros dos espejos, Como dice M. Biot, «son *formas y no materia tangible* (1).»

Siendo la materia esencialmente impenetrable, ¿sucede lo propio con los cuerpos, que están compuestos de materia? Naturalmente que sí; pero hay que formarse un concepto exacto de esta circunstancia, so pena de confundirse, aun cuando en rigor esta confusion es tan sólo aparente.

Un clavo sobre el que se descarga un martillazo, penetra en un madero; la mano metida en un líquido ocupa el puesto que necesita; nuestro cuerpo se mueve sin resistencia ostensible en la atmósfera. Estos son otros tantos ejemplos aproximados de una penetracion que no tiene nada de comun con la propiedad de que aquí se trata: cuando un cuerpo ocupa el sitio de otro cuerpo, es sobrado evidente que ambos no ocupan á la vez el mismo espacio. Por lo demás, fácilmente se comprueba en todos los casos, ó que el volúmen total de los cuerpos que de tal modo se han penetrado es igual á la suma de los volúmenes que ocupaban separadamente, ó bien si este volúmen es menor, como en el ejemplo del clavo, consiste en que mediante un esfuerzo más ó menos violento, el cuerpo duro ha rechazado, comprimido al otro.

Si se pone en un platillo un pedazo de yeso sobre una capa de agua, á los pocos instantes esta queda absorbida por el yeso, que se empapa de ella por completo sin que su volúmen aumente; hay penetracion aparente y mutua de los dos cuerpos, lo cual depende de los espacios vacíos que existen entre las moléculas del yeso.

Podríamos citar otros ejemplos no tan comprensibles ó más intrincados de penetracion aparente. En un gran número de fenómenos químicos se echa de ver que el cuerpo formado por la combinacion de otros dos presenta un volúmen ora menor, ora mayor que la suma de los volúmenes de los cuerpos componentes. Sucede lo primero cuando se mezcla agua con ácido sulfúrico ó con alcohol concentrado. Hé aquí cómo procede M. Daguin para hacer ostensible este fenómeno. Llena de agua un frasco hasta la mitad, y luego, con un embudo de pico agudo y doblado en ángulo recto, echa en el frasco alcohol, que se extiende por la superficie y llena el resto de la vasija sin mezclarse con el agua. Entonces M. Daguin introduce, pero sin revolver los líquidos, un tubo provisto de un tapon que entra muy justo en el cuello del frasco (fig. 3).

---

riamente otras nuevas. Pero añadamos que es posible que ciertas propiedades existan sin que lleguemos á conocerlas jamás. Para esto bastaria convenir en que nuestos sentidos no son bastante perfectos, ó que nos falta alguno especial.

(1) Sin embargo, si se quisiera extremar todavía más el análisis de este hecho, podria decirse que las imágenes en cuestion, llamadas *imágenes reales* por los físicos, son realidades sensibles, y que lo son porque allí donde se forman por la convergencia de los rayos luminosos, ó mejor dicho, de las ondas emanadas del objeto, hay un medio material. Sin el éter, no habria luz ni imágenes; y ¿qué es el éter sino materia, materia imponderable, es verdad, pero al fin materia, un substratum capaz de afectar nuestros sentidos con sus ondulaciones? Habria, pues, que averiguar si el éter es impenetrable. Creemos que se puede y hasta se debe presumir así; pero entonces es evidente que toda prueba experimental de esta impenetrabilidad, que no podemos apreciar en cuanto á la materia ponderable, tampoco podríamos apreciarla en cuanto al éter.

El alcohol desalojado por el tapon y por la porcion sumergida del tubo, sube hasta un nivel *a* que se marca en el tubo. Si se hace girar entonces el frasco sobre sí mismo inclinándolo, los líquidos se mezclan, viéndose al propio tiempo bajar el nivel en el tubo hasta *b*. Por

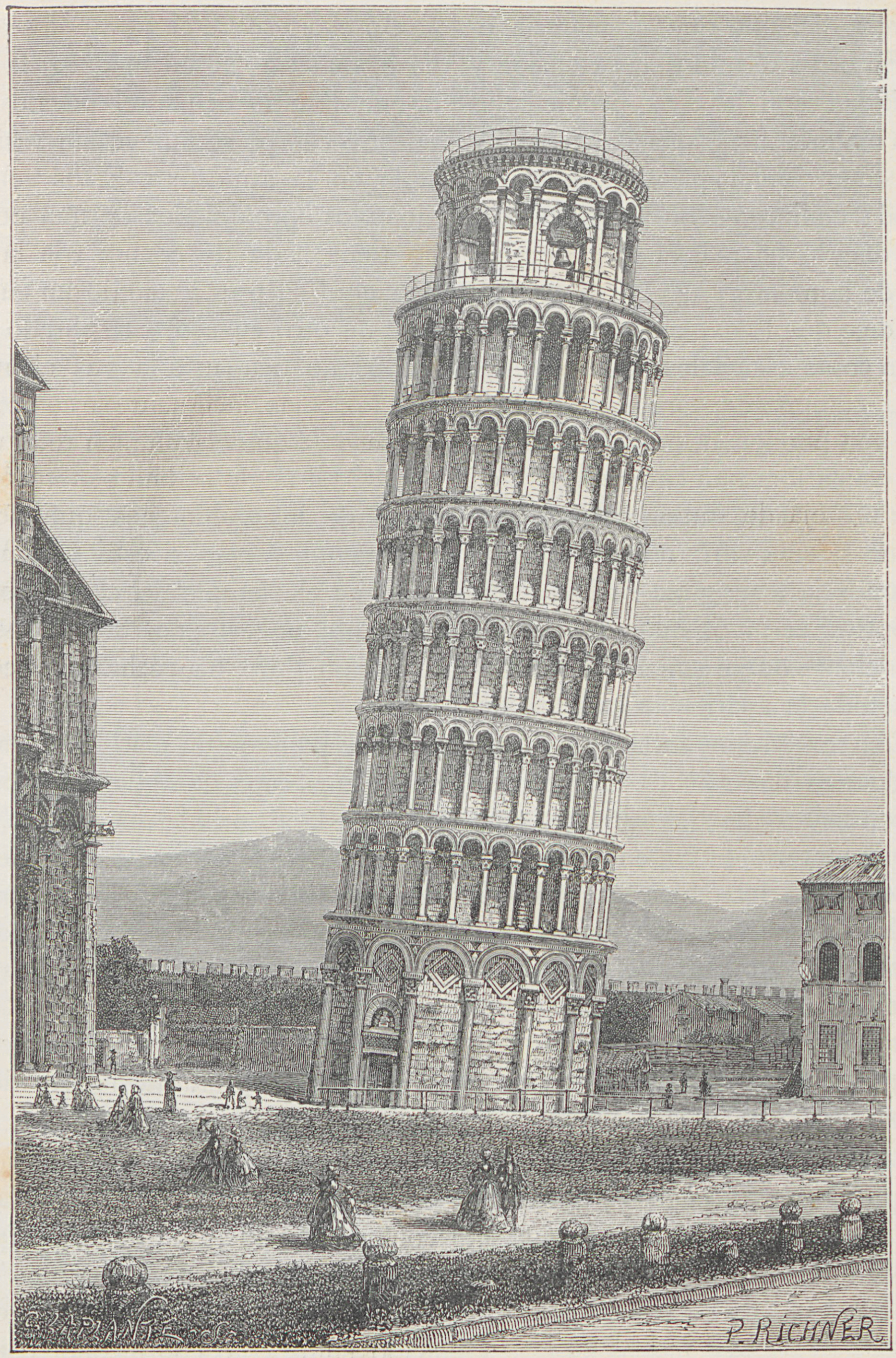


Fig. 5. — Torre inclinada de Pisa

consiguiente, el volúmen total ha disminuido, y los líquidos parece haberse penetrado recíprocamente.

Pero ¿de qué dimanan estas últimas penetraciones aparentes? De dos propiedades que tienen todos los cuerpos: la *divisibilidad* y la *porosidad*. En rigor, la materia que los constituye no es continua; sus diferentes partes, que es posible aislar entre sí valiéndose de varios medios, no se tocan; entre las más pequeñas hay espacios vacíos de materia, intersticios ó *poros*.

Estudiemos las distintas formas en que se presentan ambas propiedades en los líquidos, en los sólidos y en los gases, y en seguida comprenderemos mejor el sentido en que debe en-

tenderse la impenetrabilidad de la materia. Pero empecemos por definir los tres estados físicos en que se presentan á nuestra vista todos los cuerpos de la naturaleza.

III

ESTADOS FÍSICOS DE LOS CUERPOS.—LOS SÓLIDOS, LOS LÍQUIDOS Y LOS GASES

Los cuerpos aparecen á nuestros ojos, al ménos tales como la experiencia nos los da á conocer, en tres estados principales, presentan tres formas ó apariencias caracterizadas por propiedades distintas.

Unos, como la mayor parte de los minerales, piedras, rocas, metales, están compuestos de partes cuya adherencia es tal que guardan una forma permanente; ó cuando ménos, para variar esta forma, y con mayor motivo para desprender unas de otras las partes constitutivas de dichos cuerpos, es menester á veces hacer muchísima fuerza. Estos cuerpos son los *sólidos*, y nadie ignora que se llama dureza, tenacidad, á la resistencia que oponen á cuantos esfuerzos se hacen para dividirlos en partes, rayarlos con cuerpos más duros que ellos, romperlos ó quebrarlos. De estas propiedades de los cuerpos sólidos resultan condiciones particulares relativas á su estado de equilibrio y de movimiento.

El estado *líquido* es el de aquellos cuerpos cuyas más pequeñas partes ceden fácilmente á la presion más leve, y se deslizan con mayor ó menor movilidad unas sobre otras, pero sin dejar de estar unidas y en apariencia continuas.

El agua, varias sustancias de orígen vegetal y animal, como la savia, la leche, la sangre, el vino, el aceite, y un metal á la temperatura ordinaria, esto es, el azogue, son cuerpos líquidos, y ya es sabido que la propiedad comun á todos estos cuerpos y característica de su estado físico, consiste en que una masa cualquiera, si bien algo grande (1), no tiene en sí misma forma determinada, sino que toma la de las vasijas sólidas que la contienen, moldeándose espontáneamente, por decirlo así, sobre la forma de estas. Pero los líquidos participan tambien de una propiedad de los sólidos, cual es la de que el volúmen de unos y otros permanece constante, cuando no sufren variacion alguna en su temperatura ni en las presiones que soportan.

Por último, otros cuerpos, como el aire, tienen en sus moléculas una movilidad análoga á la de los líquidos, y áun mucho mayor por lo regular; tales son los *gases;* mas al paso que las moléculas líquidas todavía conservan entre sí una adherencia que las une en un todo de volúmen invariable, las moléculas de los gases tienen, por el contrario, una gran propension á desviarse unas de otras, á separarse. Resulta de aquí que toda masa gaseosa comprime en todos sentidos las paredes del recipiente ó vasija que la contiene, por manera que si el volúmen de este recipiente aumenta, la masa seguirá llenándole enteramente, aumentando de volúmen á su vez. Compruébase la expansibilidad de los gases por medio de sencillos experimentos. Se coge, por ejemplo, una vejiga, y haciendo que penetre en ella cierta cantidad de aire ó de cualquier otro gas, se tapa herméticamente la abertura. En este estado la vejiga conserva su forma; el volúmen de gas ó de aire que contiene sigue siendo el mismo; en una palabra, no se infla, porque la impresion del aire exterior contrabalancea la fuerza expansiva del gas interior. Pero si se pone la vejiga bajo la campana de la máquina neumática y se hace el vacío, se verá cómo la vejiga se hincha poco á poco hasta quedar sus paredes totalmente estiradas. Dejando en seguida que penetre aire en la campana, la presion exterior ejercida sobre las paredes de la vejiga va recobrando su fuerza anterior, y aquella disminuye progresivamente de volúmen hasta volver á su apariencia primitiva (fig. 4). Este experimento demuestra á la vez la expansibilidad y la compresibilidad de los gases, es decir, la propiedad que tienen de aumentar ó disminuir de volúmen, segun las variaciones de la presion á que están sometidos.

Adviértense los mismos fenómenos, cuando sin modificar la presion, cambia la temperatura del gas; su volúmen aumenta á la par que crece el calor, y disminuye en el caso contrario.

Tales son los tres estados físicos en que vemos los diferentes cuerpos de la naturaleza; pero estos cuerpos no conservan siempre la misma forma, ni su estado físico es permanente;

(1) En pequeñas masas, la mayor parte de los líquidos adquieren una forma esférica, cuando están en suspension en el aire, ó en contacto con la superficie de los cuerpos á los que no mojan.

muchos de ellos pueden presentarse sucesivamente en estado sólido, líquido ó gaseoso, pasando de uno á otro principalmente por efecto del influjo que en ellos ejercen las variaciones más ó ménos grandes de su temperatura. ¿Quién no sabe que el agua, líquida á la temperatura ordinaria ó media de nuestros climas, se congela ó solidifica tan luégo como se la somete á un frio suficientemente intenso, y que se evapora ó adquiere el estado aeriforme ó gaseoso áun á la temperatura ordinaria? Una temperatura que exceda de cierto grado la reduce enteramente al estado de vapor.

Los metales se licuan por el calor y tambien se vaporizan; el azogue, generalmente líquido, se solidifica á 40° bajo cero. Más adelante estudiaremos estos varios cambios de estado y los fenómenos que los acompañan. Hoy podemos considerar á todos los cuerpos, ó cuando ménos á todos los elementos materiales que los componen, como susceptibles de tomar los tres estados. Se ha podido licuar ó fundir todas las materias sólidas, y se ha reducido á todos los gases, áun á los que se consideraba como permanentes, al estado líquido, y luégo al sólido. Ya tendremos ocasion de ocuparnos de los curiosos y recientes experimentos que han demostrado la universalidad de tan interesantes demostraciones.

Por lo demás, hay muchos cuerpos compuestos de partes líquidas y de partes sólidas tan íntimamente unidas, que tienen toda la apariencia de cuerpos sólidos; tales son muchas sustancias pertenecientes á los séres organizados, animales y vegetales. Lo propio sucede con ciertos minerales, como la arcilla, por ejemplo, cuando no se la ha secado enteramente. Todos estos cuerpos son más ó ménos blandos, es decir, se deforman con mayor ó menor facilidad, sin necesidad de que intervenga en ello fuerza alguna. Así, pues, tanto la liquidez como la solidez, no son propiedad absoluta de los cuerpos; la movilidad de sus moléculas varía notablemente desde la consistencia pastosa de algunos de ellos hasta la movilidad extrema de otros varios, por ejemplo, los éteres. Por último, en circunstancias particulares, hay gases á los que se puede hacer adquirir un estado intermedio entre el gaseoso y el líquido.

Basándose M. Boutigny, físico distinguido de nuestros dias, en numerosos é interesantes experimentos de que hablaremos despues, ha propuesto que se tomara en consideracion un cuarto estado físico de los cuerpos, al cual ha dado el nombre de *estado esferoidal*, porque en circunstancias especiales, las diminutas masas líquidas se mantienen en forma de esfera en lugar de adquirir la del cuerpo sobre el cual reposan. Pero los físicos no han adoptado este modo de ver, por no considerarlo sino como casos particulares de los otros estados. Finalmente, el físico inglés M. Crookes ha propuesto á su vez recientemente que se admitiera un cuarto estado en los cuerpos, el cual se manifiesta cuando en una vasija cerrada se ha hecho el vacío hasta el último grado de enrarecimiento. Dicho físico pretende que la materia que queda en la vasija no goza ya de las propiedades que constituyen el estado gaseoso. Habiéndose dado el nombre de radiómetro al aparato en que ocurren los fenómenos propios de tales condiciones especiales, M. Crookes llama *estado radiante* á este cuarto estado de la materia. Nos ocuparemos de estos experimentos en un capítulo especial del MUNDO FISICO.

IV

LOS SÓLIDOS, LOS LÍQUIDOS Y LOS GASES EN LA TIERRA

Considerando la Tierra en su conjunto, vemos que está formada de tres partes que presentan, una el estado sólido, otra el líquido y otra el gaseoso (1). El globo terráqueo propiamente dicho, esto es, la parte del planeta terminada exteriormente en una cubierta ó envolvente sólida, es la primera parte; los océanos y los mares que cubren los tres cuartos de su superficie, constituyen el elemento líquido, y

(1) Es probable que un gran número de cuerpos celestes estén constituidos del mismo modo; pero no es ménos verosímil que haya tambien en ellos notables diferencias. Por ejemplo, Marte tiene continentes, mares y una atmósfera como la Tierra; Vénus y Mercurio se hallan sin duda en el mismo caso; pero en la Luna, al ménos actualmente, no hay agua ni atmósfera; es un globo que parece enteramente sólido, á no ser que su núcleo central se halle todavía, como se supone respecto del núcleo interior de la Tierra, en estado de fusion incandescente. Por otra parte, el inmenso globo de Saturno, cuya densidad es tan débil, podria muy bien no ser otra cosa sino una esfera líquida rodeada de una atmósfera; el mismo Sol parece constituido por una masa de materias flúidas, gaseosas en gran parte, y mantenidas en tal estado por una temperatura excesiva, y todas las estrellas, cuyo espectro tiene una constitucion análoga á la del espectro solar, son verosímilmente otros soles como el nuestro.

la envolvente aérea ó atmósfera forma la parte gaseosa. Si consideramos la esfera terrestre limitada por su envolvente gaseosa, y suponemos que la altura de la atmósfera es de 200 kilómetros, tendremos que el volúmen sólido excede de los 96 céntimos del volúmen total; la parte gaseosa no llega casi á los 3 céntimos, y el volúmen líquido, reducido al de los océanos, tan sólo ocupa 2 diezmilésimos.

Pero ¿podemos considerar el globo como enteramente sólido? ¿No está formado de un núcleo en estado de fusion ígnea y por consiguiente líquido? Inútil es suscitar aquí estas cuestiones, porque no son de la incumbencia de la física propiamente dicha. Ya volveremos á tratar de ellas en su tiempo y lugar.

Las proporciones que acabamos de indicar entre las partes sólidas, líquidas y gaseosas del globo terráqueo, son las que corresponden al estado actual de nuestro planeta, el cual existe probablemente hace centenares de miles de años. Pero todo induce á creer que el núcleo solidificado era mucho menor en las edades anteriores, y sobre todo la atmósfera considerablemente más extensa y de composicion más compleja. Podemos formarnos una idea de la probabilidad de esta presuncion, calculando lo que seria la Tierra si la temperatura general aumentase ó disminuyese en extensos límites.

Nuestro gran Lavoisier publicó una interesantísima Memoria acerca de este asunto, que figura en la edicion de sus *Obras completas*, y de la que trascribiremos algunos párrafos:

«Las consideraciones que acabo de hacer sobre la formacion de los flúidos aeriformes, dice, arrojan gran luz acerca del modo como se formaron, en el orígen de las cosas, las atmósferas de los planetas, y particularmente la de la Tierra. Concíbese que esta última debe ser el resultado y la mezcla: 1.° de todas las sustancias susceptibles de vaporizarse, ó mejor dicho, de subsistir en estado aeriforme, á los grados de temperatura y de presion á que vivimos actualmente; 2.° de todas las sustancias flúidas ó concretas capaces de disolverse en ese conjunto de diferentes flúidos aeriformes.

»Para comprender mejor cuanto se relaciona con esta materia, sobre la cual no se ha reflexionado lo bastante, figurémonos por un momento lo que seria de las varias sustancias que componen el globo, si cambiara bruscamente la temperatura. Supongamos por ejemplo, que la Tierra se encontrase trasportada de pronto á una region mucho más caliente del sistema solar, á una region, verbigracia, en que el calor ordinario fuese muy superior al del agua hirviendo: el agua, todos los líquidos susceptibles de vaporizarse á temperaturas próximas á la del agua hirviendo y hasta muchas sustancias metálicas entrarian muy pronto en expansion y se trasformarian en flúidos aeriformes que llegarian á ser partes de la atmósfera. Estos flúidos aeriformes se mezclarian con los ya existentes, resultando de ello descomposiciones recíprocas y composiciones nuevas, hasta que, satisfechas ya las diferentes afinidades, los principios que compusieran esos distintos flúidos llegasen á un estado de reposo. Pero no debemos omitir una consideracion, y es que tambien esta vaporizacion tendria sus límites; en efecto, á medida que aumentara la cantidad de los flúidos aeriformes, creceria en proporcion la gravedad de la atmósfera. Ahora bien, puesto que una presion cualquiera es un obstáculo á la vaporizacion, puesto que los flúidos más evaporables pueden resistir sin vaporizarse un calor muy fuerte cuando media una presion proporcionalmente más fuerte, y en fin, puesto que hasta el agua, y probablemente otros muchos líquidos pueden experimentar en la marmita de Papin un calor capaz de enrojecerlos, compréndese que la nueva atmósfera llegaria á un grado tal de gravedad que el agua que no se hubiese vaporizado hasta entónces dejaria de hervir y permaneceria en estado líquido; por manera que áun en esta suposicion como en cualquiera otra del mismo género, la gravedad de la atmósfera seria limitada y no podria pasar de cierto punto. Fácil seria llevar más adelante estas reflexiones y considerar lo que en semejante hipótesis sucederia á las piedras, á las sales y á la mayoría de las sustancias fusibles que componen el globo; es presumible que se ablandaran, que entraran en fusion y formaran líquidos; pero estas últimas consideraciones son ya ajenas á mi asunto, por lo cual me apresuro á volver á él.

»Veamos ahora el efecto contrario. Si la Tierra se hallase de repente situada en regio-

nes sumamente frias, por ejemplo, en las de Júpiter y Saturno, el agua que hoy forma nuestros rios y nuestros mares, y probablemente la mayor parte de los líquidos que conocemos, se trasformaria en montañas sólidas, en durísimas rocas, al principio diáfanas, homogéneas y blancas, como el cristal de roca, pero que, mezclándose poco á poco con sustancias de diferente naturaleza, se convertirian por último en piedras opacas de variados colores.

»En esta suposicion, el aire, ó cuando ménos una parte de las sustancias aeriformes que lo componen, dejaria sin duda de existir en estado de flúido invisible, por carecer del grado de calor suficiente; volveria pues al estado de liquidez, y de esta trasformacion resultarian nuevos líquidos de que no tenemos idea alguna.»

Esas dos hipótesis extremas de cuyas consecuencias se ocupó Lavoisier, ¿se han realizado ó podrán realizarse algun dia por lo que respecta á la Tierra? No hay nada que autorice á afirmarlo en absoluto. Sin embargo, por una parte puede tenerse por probable que en una época considerablemente apartada de las edades geológicas, la radiacion calorífica del Sol fué bastante poderosa para producir en la superficie de nuestro globo, suponiendo que nuestro globo existiera ya, una temperatura capaz de vaporizar sustancias hoy dia líquidas, y de fundir otras que actualmente son sólidas. Tambien es de presumir que en un número indeterminado de millones de años, la radiacion del Sol, paulatinamente menor, llegue á ser tan débil que se realicen los efectos de la segunda hipótesis, y constituyan la superficie de la Tierra rocas nuevas y cubiertas de líquidos que, siendo ahora gaseosos, formen entónces su atmósfera. Y áun quizá no exista tampoco esta atmósfera.



Fig. 6.—Fibras vegetales: A, seda; B, lana; C, cáñamo; D, algodon.—(Aumento=120 diámetros)

Las variaciones de la excentricidad de la órbita de la Tierra pueden asimismo producir efectos parecidos, siquiera bastante menores. Fijémonos, por ejemplo, en su estado actual, y comparémoslo con lo que será en la época de excentricidad máxima. El calor recibido hoy por la Tierra en su perihelio excede en unos 0,0335 del que recibe á su distancia media, el cual supera á su vez en igual cantidad al que nuestro planeta recibe cuando está en su afelio; en junto 0,0770, ó sea la duodécima ó décimatercera parte del calor total, como diferencia de calor radiado en las dos posiciones extremas.

Siendo la excentricidad máxima, segun Le Verrier, igual á 0,077747, es fácil calcular que el calor radiado excederá en 0,3655 del del afelio en las épocas en que la órbita terrestre haya llegado ó llegue á dicho máximum de excentricidad. Aquí la diferencia de calor entre las es-

taciones extremas se eleva casi al tercio del calor total. Una variacion de calor tan considerable produce evidentemente contrastes de temperatura entre las estaciones invernal y estival del hemisferio cuyo invierno coincida con el afelio, contrastes merced á los cuales se puede explicar ciertos períodos geológicos, como los períodos glaciales. Pero de esto á los estados extremos supuestos por Lavoisier hay todavía mucha distancia.

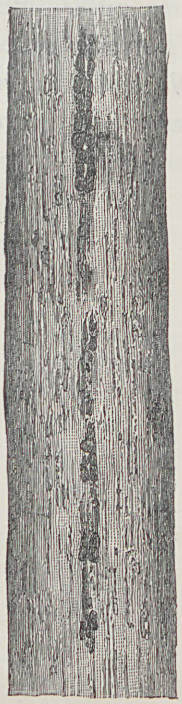


Fig. 7.—Fragmento de cabello visto con el microscopio (180 diámetros)

Estos estados hipotéticos se han presentado ó se presentarán en épocas extraordinariamente lejanas de la nuestra, al principio ó al fin del planeta en que vivimos. Pero quizás existan actualmente en el mundo solar, en Mercurio ó Vulcano, por lo que hace al período de calor excesivo, y en Urano ó Neptuno, por lo que respecta al del frio. En cuanto á lo que á nuestro planeta se refiere, á ménos de sobrevenir trastornos cósmicos imposibles de prever, podemos asegurar que la composicion actual del globo terráqueo y la proporcion de los líquidos, sólidos y vapores ó gases que contiene seguirán siendo las mismas por espacio de un número de siglos que puede contarse por millares.

V

DIVISIBILIDAD DE LOS CUERPOS

La observacion y la experiencia diarias nos demuestran que todos los cuerpos están formados de partes que se separan unas de otras con mayor ó menor facilidad; los sólidos, lo mismo que los líquidos y los gases, se subdividen en fragmentos, en partículas más y más diminutas. Esta separacion se obtiene, ya valiéndose de medios mecánicos, ó bien utilizando las fuerzas físicas; pudiendo llegar en todos los cuerpos á tal grado de tenuidad, que las partículas más finas nos pasan desapercibidas y ni áun con el microscopio pueden verse.

¿Es indefinida esta propiedad de los cuerpos? En otros términos, ¿es la divisibilidad, no tan sólo una propiedad general de los cuerpos, sino de la materia misma que los compone? Cuestion es esta que no se puede resolver prácticamente;

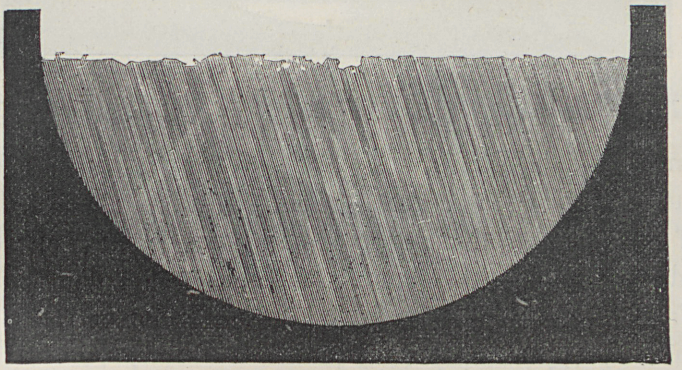


Fig. 8.—Filo de una navaja de afeitar visto con el microscopio.—(120 diámetros)

en el estado actual de la ciencia, las teorías físico-químicas responden negativamente; más adelante, trataremos de exponer las razones que militan en pro de la existencia real de los átomos (1), es decir, de las partes más pequeñas en que se puede subdividir los cuerpos simples de que están á su vez formados todos los cuerpos de la naturaleza. Aquí nos limitaremos á citar los casos de divisibilidad más notables y á propósito para ilustrarnos acerca de la estructura íntima de los cuerpos y de su constitucion molecular.

Los cuerpos sólidos más duros se reducen á polvo impalpable, las piedras, el cristal y el mármol á martillazos, los metales limándolos, y hasta el diamante se convierte en un polvillo de extraordinaria tenuidad, ó sea el esmeril (polvo de corindon), que sirve, como es sabido, para tallar y pulir sus facetas. Los batidores de

(1) La palabra *átomo* se deriva de la griega *atomos*, la cual tiene por etimología el *a* privativo, y *temno*, cortar. Por consiguiente, átomo significa *lo que no se puede cortar*.

oro reducen este metal á hojas tan tenues, que se necesita sobreponer más de 10,000 para formar con ellas un milímetro de espesor. Una hoja de oro laminado de un decímetro cuadrado de superficie y de un diezmilésimo de milímetro cuadrado de espesor, pesa unos 19 milígramos; suponiendo esta superficie dividida en partes de un milésimo de milímetro de lado, habria en todo diez mil millones; cada una de estas partes, visible con el microscopio, pesaria pues ménos de dos mil millonésimas de milígramo.

¿Quién no conoce el ingenioso procedimiento de que se ha valido el doctor Wollaston para estirar un alambre de platino, cuyo diámetro

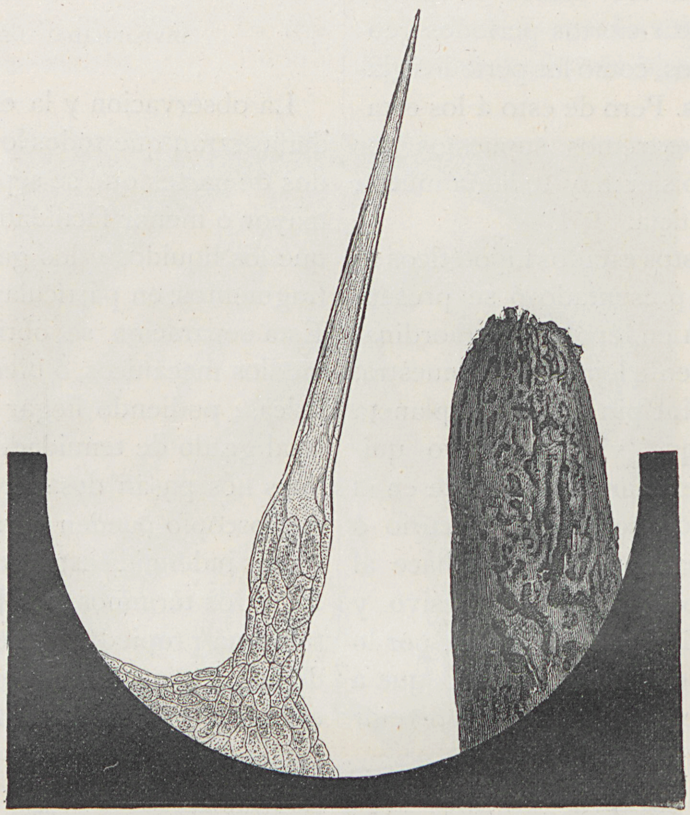


Fig. 9. — Cabello y punta de una aguja, vistos con el microscopio. — (Aumento = 150 y 120 diámetros)

era tan pequeño, que mil metros de dicho alambre no pesaban más que cuatro ó cinco centígramos, áun cuando el platino sea el más denso de los cuerpos conocidos? Dicho físico sujetó al eje de un molde cilíndrico de un quinto de pulgada inglesa de diámetro, un alambre de platino de un centésimo de pulgada de diámetro ($0^{mm},254$); luégo llenó el molde de plata en fusion, de modo que resultó un cilindro de plata cuyo eje era de platino. Al pasarlo por la hilera, el cilindro compuesto se estiró hasta quedar reducido á un alambre finísimo, y como los diámetros debieron conservar durante la operacion sus relaciones de magnitud, el hilo de platino interior, cien veces más delgado que el de plata, resultó reducido á un 1200.° de milímetro de espesor. Para aislarlo, Wollaston trató el alambre compuesto por una corta cantidad de ácido nítrico, que, disolviendo la envoltura de plata, dejó á descubierto el alambre de platino.

En los hilillos de plata sobredorada, de que tanto uso se hace en los bordados y pasamanería, tenemos un ejemplo análogo de una divisibilidad material llevada hasta el extremo. Un cilindro de plata rodeado de hojuelas de oro, de 30 gramos de peso, da en la hilera un alambre de 144 kilómetros de longitud. El vidrio se estira tambien trasformándolo en hilos sumamente finos, tenues y flexibles como hebras de seda, para lo cual se calienta hasta el blanco un tubo fino de cristal y se le estira en seguida, de suerte que el filamento mismo tiene la forma de un tubo, por cuyo interior se puede hacer pasar líquidos.

Los líquidos se reducen á gotitas impalpables: en los saltos de agua, como las cataratas del Niágara y del Zambezé, la division produ-

cida por la resistencia que el aire opone á la caida del líquido así como la que resulta del choque es tal que á todas horas se ven columnas de vapor, ó más bien nieblas, pues el vapor propiamente dicho es enteramente trasparente ó invisible.

La trasformacion de los líquidos en vapor es un ejemplo mucho más marcado de esta divisibilidad.

Las mismas materias orgánicas proporcionan una porcion de ejemplos naturales de la divisibilidad de la materia que forma los cuerpos. Las hebritas de lana ó de seda son de un diámetro que varía entre un vigésimo y un centésimo de milímetro; pues bien, si se examinan con el microscopio las hebras de dichas sustancias, se ve que la anchura de tan reducidísimos diámetros se compone de un crecido número



Fig. 10.—Vorticelas y mónadas vistas con el microscopio

de partículas orgánicas (fig. 6). Los pelos de los animales son á veces sumamente finos. El cabello (fig. 7) es, como el hilo de cristal á que hemos aludido ántes, un tubo que tiene sus paredes y su canal interior. El microscopio nos lo presenta de forma bastante tosca; y acabamos de ver que otras muchas sustancias orgánicas ó inorgánicas le aventajan en tenuidad.

Con sobrada frecuencia nos pasan desapercibidas las más diminutas partículas de materia. Cuando juzgamos con la vista ó con el tacto de la tersura de una superficie, no sentimos ni distinguimos las irregularidades, los resaltos de esas superficies, que sólo son perceptibles con el microscopio. Para que resulte esa tersura, se hace uso por lo comun de polvos finos, con los cuales se frotan los metales, los mármoles y las piedras preciosas; pues bien, cada grano de estas sustancias, tales como el trípoli, el esmeril, obra destruyendo las asperezas del cuerpo, pero tambien rayándolo, llenándolo de estrías sumamente finas, que ni las ven los ojos ni las nota la mano que pasa por la superficie. El microscopio descubre esas estrías, esas desigualdades, del mismo modo que permite distinguir en las sustancias organizadas partículas de una pequeñez tal que las hace invisibles á la simple vista. Examínese el filo de una navaja de afeitar ó la punta de una aguja á la simple vista, y compárese despues con el tosco aspecto que les da la vista microscópica (figs. 8 y 9).

Ni áun estas pequeñísimas partes, cuya existencia nos revela el microscopio, dejan de ser divisibles: á menudo consisten en órganos complejos, en agregados de moléculas, formadas á su vez de partes, puesto que la química nos indica su composicion. Esos infusorios, vorticelas y mónadas (fig. 10) que viven y se mueven, tienen necesariamente órganos muy sencillos á veces, pero que no por esto dejan de

serlo; unos propios para la locomocion, otros para la nutricion ó reproduccion. Cada uno de los glóbulos de la sangre, tan pequeños que hay más de un millon en un milímetro cúbico del líquido que coloran, es una especie de disco excavado en sus dos caras, y compuesto sin duda alguna de un número incalculable de moléculas orgánicas.

Ya hemos visto que era fácil reducir los

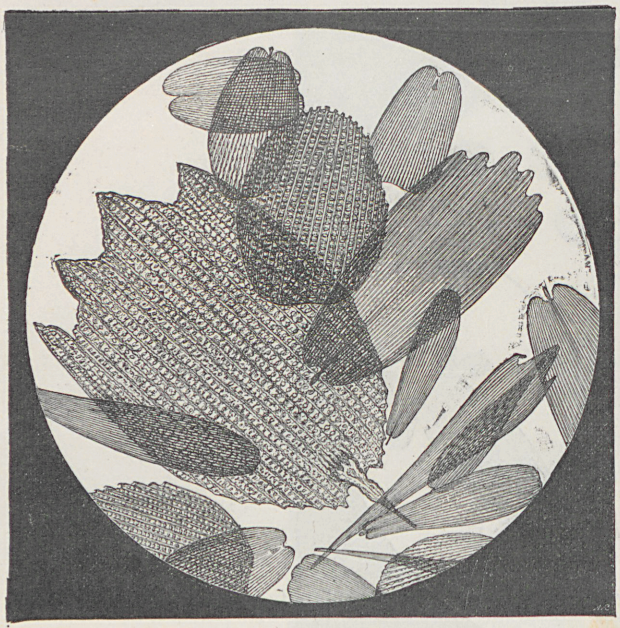


Fig. 11.—Plumillas de varias mariposas. Escamas de la forbicina. (Aumento=100 á 150 diámetros)

metales á láminas de extraordinaria delgadez mediante una operacion puramente mecánica. En las burbujas de jabon vemos tambien que puede darse á los líquidos ménos espesor todavía; y en efecto, cuando estudiemos los fenómenos de la óptica, tendremos ocasion de ver que los brillantes colores de que parecen matizadas, dependen, como Newton lo demostró por primera vez, del espesor mismo de la película líquida que las forma, colores que aparecen tan luégo como este espesor queda reducido á la diezmilésima parte de un milímetro. A medida que disminuye, otros matices suceden á los primeros, y por último, un momento ántes de reventar la burbuja, preséntanse manchas negras en la superficie. En tal instante, la delgadez de la burbuja ha llegado á su mayor límite, no siendo ya más que la cienmilésima parte de un milímetro. Tambien llega aquí el límite del sentido de la vista; si fuera posible formar una burbuja de jabon tan delgada en toda su periferia, no reflejaria ya ninguna onda luminosa y seria invisible. Los colores del nácar, los de las alas de las mariposas tienen por causa, lo mismo que los de la burbuja de jabon, fenómenos de difraccion producidos por la excesiva tenuidad de las estrías ó de las escamas microscópicas de que está cubierta la superficie de estos objetos (fig. 11).

Gracias al análisis espectral, se puede tambien comprobar la presencia de partículas infinitesimales de materia. La raya amarilla del espectro que caracteriza al sodio aparece muy visible en el espectroscopio aun cuando la llama que la produce no contenga más que una fraccion reducidísima de este metal. Segun Kirchhoff y Bunsen, basta un tres-millonésimo de milígramo de sodio para que dicha raya aparezca al punto (1).

Lo que no percibimos con el tacto, ni con la vista, áun auxiliada por el microscopio, ó por el espectroscopio, y hasta favorecida por los brillantísimos fenómenos de dispersion y difraccion, puede ser todavía accesible á nuestros sentidos y darnos una idea de la extraordinaria divisibilidad de la materia. Por este concepto, el olfato parece algo más sutil que la vista.

En efecto, ciertos perfumes dejan vestigios perceptibles al cabo de un período de tiempo sumamente largo. Un pedacito de almizcle difunde un olor intensísimo por todos los ámbitos de la habitacion en que se halla. Si se le pone en equilibrio en uno de los platillos de una balanza muy sensible, y se le deja por espacio de un año entero en una estancia cuyo aire se renueva constantemente, el equilibrio subsistirá al cabo del año. Sin embargo, ese olor que se esparce á cada momento por un volúmen de aire considerable, lo percibe nuestro olfato gracias á las partículas materiales desprendidas del

(1) «Hemos hecho deflagrar, dicen, tres milígramos de clorato de sosa, mezclados con azúcar de leche, en el sitio de la sala más lejano del aparato, miéntras observábamos el espectro de la llama no iluminadora de una lámpara de gas; la habitacion en que se hacia el experimento tendria unos 60 metros cúbicos. A los pocos minutos coloróse la llama de amarillento leonado y presentó la raya característica del sodio con gran intensidad, cuya raya no se disipó hasta diez minutos despues. A juzgar por la capacidad de la sala y el peso de la sal empleada para el experimento, se deduce fácilmente que el aire del aposento no contenia en suspension más que una veintemillonésima de su peso de sodio. Considerando que basta un segundo para observar cómodamente la reaccion, y que durante este tiempo la llama consume 50 centímetros cúbicos ó 0 gr. 0647 de aire que sólo contienen una veintemillonésima de milígramo de sal de sosa, puede calcularse que la vista percibe distintamente la presencia de ménos de una tresmillonésima de milígramo de sodio.»

grano de almizcle. El peso de todas estas numerosísimas partes de materia es asombroso; de cuya circunstancia podemos juzgar á la vez de la sensibilidad de nuestro órgano olfatorio, y de la extraordinaria divisibilidad de que ciertas sustancias están dotadas (1)

En todos los ejemplos que acabamos de citar para poner en evidencia la divisibilidad de los cuerpos, no se ha hecho intervenir sino acciones mecánicas ó físicas, de suerte que las más pequeñas partículas ponderables que se han podido apreciar de tal modo, conservan hasta el fin las propiedades de los cuerpos que componian. Y ya sean simples estos cuerpos, segun la definicion que la química da de los *cuerpos simples*, ó bien estén formados por la combinacion de dos ó muchos de ellos, las partículas en cuestion subsisten física y químicamente idénticas, así ántes como despues de la division.

Así pues, todos los cuerpos de la naturaleza están constituidos por la agrupacion, reunion, ó asociacion de partes sumamente pequeñas, dándose el nombre de *moléculas* á las más diminutas; pero si la experiencia prueba la existencia de las moléculas, no puede asegurarse que lleguemos jamás á percibirlas; más adelante veremos que estas últimas partes de los cuerpos deben de ser todavía muchísimo más pequeñas que aquellas cuya existencia nos han revelado los sentidos ó los instrumentos.

Aquí se presenta una cuestion que tan frecuentemente y por espacio de tanto tiempo se ha debatido en las escuelas de filosofía, y de la cual hemos indicado ya algo, á saber: si la materia es ó no susceptible de una divisibilidad indefinida. Los hombres de más talento se han puesto frente á frente respecto de este asunto, y unos, como Anaxágoras y Aristóteles en la antigüedad, y Descartes en los tiempos modernos, suponian que la materia es divisible hasta lo infinito; miéntras que otros, como Demócrito, Epicuro, Lucrecio y Gassendi han profesado la opinion contraria.

(1) «Una simple gota de aceite esencial de rosa basta al evaporarse para hacernos percibir un olor agradable. Una cantidad infinitesimal de almizcle comunica á la ropa el olor especial que caracteriza á esta sustancia y que persiste por espacio de muchos años sin que lo disipen las corrientes de aire más fuertes. Valentin ha calculado que podemos percibir el olor que desprenden dos millonésimas de miligramo de dicha sustancia. Nuestro olfato supera pues en sensibilidad á todos los demás órganos de los sentidos.» (Bernstein, *Los Sentidos.*)

A decir verdad, los primeros sostenian su tésis en su calidad de geómetras ó de metafísicos. Considerada así, comprendese que por pequeña que sea la extension de una partícula de materia, puede dividirse en dos partes, luégo cada una de estas en otras dos y así sucesivamente, no habiendo límite para esta division ideal. Pero en la realidad ¿es posible semejante division? Repetimos que no es esta una cuestion que pueda resolverse experimentalmente, toda vez que, por muy adelante que llevemos la division efectiva, esta no podrá pasar de cierto punto. Los físicos modernos han llegado á admitir la existencia de los *átomos*, es decir, de partes de la materia que resisten necesariamente á toda division ulterior, en virtud de consideraciones teóricas, basadas en hechos, en casos prácticos de la química, en las leyes de las combinaciones de los cuerpos. Cuando volvamos á ocuparnos de las cuestiones tan interesantes, pero todavía tan oscuras, de la constitucion de la materia, en los capítulos de esta obra consagrados á la física molecular, procuraremos exponer las razones que han inducido á adoptar la hipótesis de los átomos. Ahora semejante exámen seria prematuro, por lo cual seguiremos tratando del asunto que nos ocupaba ó sea del estudio de las propiedades generales de los cuerpos.

VI

POROSIDAD

Puesto que todo cuerpo es divisible en un crecidísimo número de partes muy pequeñas, convendria saber si estas partes forman un todo continuo, si se tocan en todas sus caras, ó si tan sólo están agrupadas con alguna separacion, dejando entre sí espacios no ocupados por la materia, ó á lo ménos por una materia idéntica á la del cuerpo mismo.

Supongamos una piedra de mármol, un pedazo de cristal, de cobre ó de un metal cualquiera. A juzgar por las apariencias, la materia que compone estos cuerpos está tan unida, tan compacta, sus moléculas tan apiñadas, que no se distingue entre ellas ningun intervalo apreciable. En cambio, la madera, el yeso, ciertas piedras ó rocas parecen constituidas de tal suerte que existen entre sus moléculas numerosos va-

cíos, algunos de ellos bastante grandes á veces para que se los pueda discernir á la simple vista; otros exigen la intervencion del microscopio, y por último, aunque otros son absolutamente invisibles, se echa de ver su presencia por la penetracion de los flúidos ó de los líquidos en el interior del cuerpo. A los cuerpos de esta clase se les da el nombre de *porosos*, y los intervalos ó vacíos de que hablamos se llaman *poros*.

¿La *porosidad* es una propiedad general de los cuerpos? Antes de responder á esta pregunta, conviene hacer una distincion, que se comprenderá mejor con algunos ejemplos.

Hay una primera especie de porosidad tosca, de la que la esponja puede darnos una idea y que se nota con bastante frecuencia en las sustancias orgánicas. En las esponjas se ve una multitud de agujeros de todos tamaños (fig. 12);

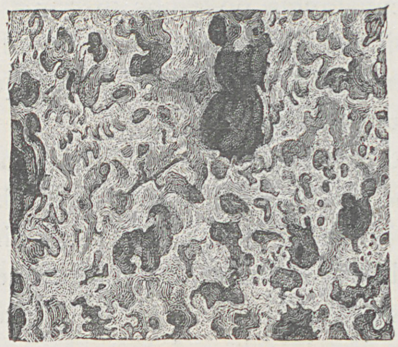


Fig. 12.—Agujeros y poros aparentes de una esponja

pero estos vacíos, en que falta absolutamente la materia del cuerpo, deben considerarse tan sólo como soluciones de continuidad puramente

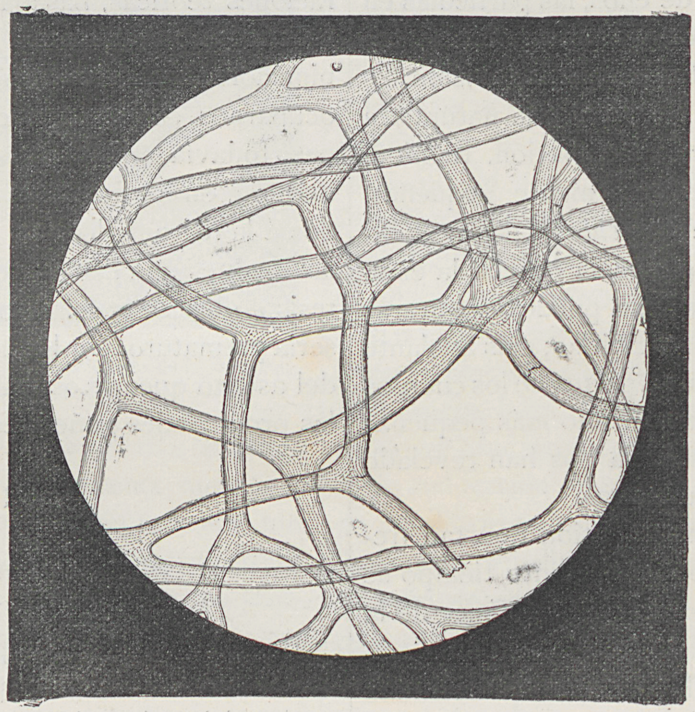


Fig. 13.—Fragmento de una esponja, visto con el microscopio (80 diámetros)

accidentales. Otros cuerpos, y en especial los líquidos, se introducen en ellos con facilidad suma, y llenando todas esas especies de poros, así los más grandes como los más pequeños, originan el aumento de volúmen aparente de la esponja misma. Pero su existencia no prueba en modo alguno que semejantes intervalos separen las moléculas constitutivas, es decir, las más pequeñas partículas divisibles de la materia de la esponja. Y efectivamente, con el microscopio se puede ver que la esponja está formada de una multitud de hilos, ó mejor dicho, de canales entrelazados en todos sentidos (fig. 13); y por consiguiente, los vacíos que los separan no tienen nada de comun con los verdaderos poros.

Una porosidad análoga es la que se observa en toda clase de tejidos, en las hojas de papel, en las telas, y en los fieltros de que se hace uso para filtros. Los tejidos de los vegetales, los órganos de los animales examinados con el microscopio, presentan una estructura del mismo género que los hace esencialmente permeables á los líquidos y á los gases (en una diatomea que tiene medio milímetro hay más de 50,000 celdillas); y allí donde la vista no distingue ya poros, la circulacion de la savia en las plantas,

la de la sangre y demás líquidos del organismo en los animales demuestran hasta la evidencia que tales poros existen.

Podríamos definir esta primera clase de porosidad diciendo que consiste en la propiedad que tienen los cuerpos de ser permeables á los flúidos, tanto líquidos como gases. Pero la experiencia prueba que esta propiedad no es absolutamente general.

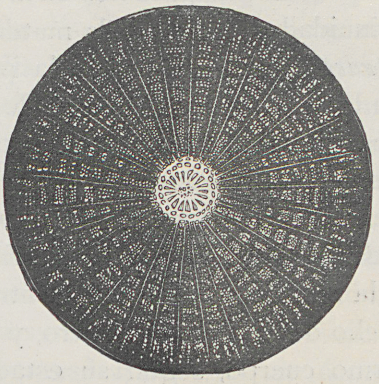


Fig. 14.—Celdillas de una diatomea (100 diámetros)

Verdad es que muchos cuerpos, á los que podríamos creer como no porosos, lo son en efecto. Más arriba hemos citado el mármol y los metales; un pedazo de mármol parece impermeable al agua; áun cuando tiene la misma composicion química que la creta, no se empapa como esta; cuando se le introduce en agua, no se nota que suban las burbujillas de aire á la superficie, como sucede con un pedazo de creta en las mismas circunstancias. Con todo, á la larga y mediante una fuerte presion, las piedras más duras se empapan y humedecen en su interior; luego tienen esta primera clase de porosidad.

Podemos citar tambien el ejemplo de la *hidrófana blanca* ú *ópalo*, que es una variedad de cuarzo, semi-trasparente cuando seca, y que se vuelve de pronto diáfana cuando se la mete en agua. Si se la pesa ántes y despues de la inmersion, se advierte una diferencia de peso que marca la cantidad de agua absorbida. Además, las burbujas de aire que se desprenden, como sucede con la creta, prueban que esta sustancia es realmente porosa, aunque los poros sean demasiado pequeños para que pueda vérselos.

Siempre se cita como ejemplo de la porosidad de los metales el famoso experimento de los sabios florentinos de la Academia del *Cimento*. Este experimento, hecho en 1661, tenia por objeto averiguar si el agua es compresible, y consistia en llenar de este líquido una esfera hueca de plata, herméticamente cerrada con un tapon de tornillo, y en ejercer despues sobre su superficie una presion bastante fuerte para deformarla, y por consiguiente para reducir su volúmen (1). Los académicos observaron que el líquido se rezumaba al través del metal, y se depositaba en forma de rocío en la superficie de la esfera. Desde entónces se ha repetido muchas veces este experimento con varios metales, con esferas de oro, de cobre, etc., y siempre con el mismo resultado. Sin embargo, se ha adquirido la certidumbre de que el líquido no pasa por los poros de la cubierta sólida, sino por grietas ó hendiduras imperceptibles, causadas por la fuerza de la presion.

En todo caso, aquí se trataria tan sólo de la permeabilidad de la materia, y no de la porosidad intermolecular de la que vamos á ocuparnos. Tambien es cierto que no todos los cuerpos poseen la propiedad de ser permeables á los flúidos, á lo ménos dadas las condiciones de experimentacion en que han podido colocarse hasta ahora los físicos, lo cual es una ventaja. Si el cristal no disfrutara, por ejemplo, de esa perfecta impermeabilidad, si no resistiera hasta romperse todas las presiones ejercidas en su superficie por los flúidos ó los gases que se encierran en los objetos fabricados con él, habria sido imposible de todo punto hacer un gran número de experimentos físicos y la mayor parte de los químicos. La ciencia estaria todavía en su infancia.

Así pues, la estructura porosa de la mayoría de los cuerpos resulta de los hechos que acabamos de enumerar. Casi todos ellos están acribillados de una infinidad de vacíos, de agujeritos, unos visibles á la simple vista, otros solamente con el microscopio, y por último, otros imperceptibles. De aquí se sigue que, en condiciones de presion á propósito, los cuerpos de que se trata son permeables á los líquidos y á los gases. Algunos otros, como los metales, las sustancias cristalinas ó vítreas y sobre todo el vidrio, no son permeables. Comprendida pues de este modo la porosidad, se ve que no es una propiedad general, universal de los cuerpos.

(1) La esfera es, entre los sólidos de superficie igual, el que tiene mayor volúmen.

No sucede lo propio con la *porosidad intermolecular*, por la cual se entiende los intervalos que separan entre sí á las últimas ó más diminutas moléculas de los cuerpos, ó los átomos, si se trata de cuerpos químicamente simples. En los cuerpos porosos de que hemos hablado anteriormente, los vacíos ó poros separan partículas más ó ménos pequeñas de materia, pero estas partículas están formadas todavía por la agregacion de innumerables moléculas. ¿Están estas contiguas, se tocan, ó bien se hallan situadas á cierta distancia unas de otras? Esta cuestion está todavía por resolver, entendiéndose lo mismo de las moléculas de los cuerpos permeables á los flúidos que de las de los cuerpos que tenemos por impermeables.

Pues bien, todo prueba que esta porosidad intermolecular existe en todos los cuerpos, así en los sólidos y en los líquidos como en los gases. ¿Cómo se demuestra la realidad de esta afirmacion? No ya por medio de experimentos directos, como hemos podido hacerlo para demostrar la porosidad comun ó permeabilidad, sino en virtud de experimentos que la implican necesariamente.

VII

DILATABILIDAD DE LOS CUERPOS

Hay una propiedad comun á todos los cuerpos, la de cambiar de volúmen siempre que su temperatura varía: si esta aumenta, el volúmen crece, el cuerpo se dilata; si, por el contrario, disminuye, el volúmen disminuye tambien, y el cuerpo se contrae. Es un fenómeno comprobado respecto de los sólidos, los líquidos y los gases, y que no admite excepcion, á no ser cuando se trata de temperaturas en que ciertos cuerpos cambian de estado físico, pues en este caso puede suceder que, en virtud de la influencia de las modificaciones que dichos cambios introducen en la disposicion molecular, haya contraccion en vez de dilatacion ó viceversa: nadie ignora que el agua enfriada á ménos de + 4 centígrados se dilata hasta 0 grados, punto de su congelacion. Sea de ello lo que fuere, lo cierto es que estos fenómenos ponen en evidencia que el volúmen de los cuerpos es esencialmente variable, siendo por lo tanto necesario admitir que la materia de que están formados no es continua, que las moléculas ó átomos no se tocan en ellos; y ya hemos visto que este es un hecho positivo respecto de un gran número de cuerpos que son porosos, ó si se quiere, permeables á los flúidos, á los líquidos y á los gases; pero esto no deja de ser evidente tambien acerca de los que carecen de esta permeabilidad, por cuanto experimentan lo mismo que los otros esos fenómenos de dilatacion y de contraccion que serian inexplicables en la hipótesis de la continuidad absoluta de la materia.

La *contractilidad* consiste en la propiedad que tienen los cuerpos de disminuir de volúmen á causa de algun descenso de temperatura; pero lo propio sucede tambien cuando se los somete á un aumento de presion exterior, sólo que en este caso dícese que hay *compresibilidad*. Por lo demás, la compresibilidad y la contractilidad varían mucho de un cuerpo á otro, y tambien en un mismo cuerpo, segun su estado físico. Por ejemplo, los gases disminuyen la 237ª parte de su volúmen á cada grado de enfriamiento; la contraccion del mercurio líquido, en el propio caso, no es más que la 5550ª parte de su volúmen, y en el cobre en estado sólido es tan sólo la 20,000ª. Aquí anticipamos sólo ejemplos aislados, pues en su lugar oportuno describiremos y estudiaremos todos estos fenómenos.

Por ahora nos proponemos únicamente dar una idea preliminar de la estructura de los cuerpos, valiéndonos de ciertas indicaciones sobre sus propiedades generales. Hemos visto ya que hay fundado motivo para considerarlos como agregaciones de partículas aisladas, sumamente pequeñas, separadas ó aproximadas unas á otras por las fuerzas mecánicas ó físicas, y cuyo estado de equilibrio varía sin cesar, por decirlo así. ¿Cuáles son las verdaderas dimensiones de estas partículas de las moléculas y de los átomos? ¿A qué distancia están colocadas unas de otras en los diferentes cuerpos, ya sea en razon de su composicion ó de su naturaleza química, ó bien en razon de su estado físico? ¿Qué movimientos las animan? ¿Qué fuerzas las mantienen reunidas? ¿Qué es cohesion, qué afinidad? ¿Qué es atraccion molecular, calor, etc.?

No es cosa fácil ni tal vez posible responder á estas preguntas dado el estado actual de la ciencia, pero como forman el objeto primordial

de la física, trataremos de indicar sucesivamente sus soluciones parciales.

Volviendo á los cambios de volúmen que producen en los cuerpos las variaciones de presion y de temperatura, diremos que lo que principalmente resulta de ellos es que no conocemos el *volúmen real*, *absoluto* de un cuerpo, y que lo único que podemos medir es el *volúmen aparente*. No cabe dudar que la contraccion debe de tener un límite, puesto que tambien lo tiene la disminucion de temperatura, y que hay en ella, segun veremos en otra parte, un cero absoluto. Pero si la práctica nos permite llegar alguna vez á este límite, y si entónces conseguimos determinar el volúmen minimum de los diferentes cuerpos, ¿se seguirá necesariamente de aquí que este volúmen sea el de la materia misma de que está formado, es decir, igual á la suma de los volúmenes de los átomos constituyentes? Esto equivale á preguntar si dichos átomos son capaces de ponerse alguna vez en contacto y formar un todo continuo, ó si por el contrario, guardan forzosamente entre sí distancias que no pueden franquear y que señalan el límite extremo de su mayor proximidad. Apénas podemos confiar en que la observacion resuelva algun dia este problema. Las teorías mejor fundadas de la química y de la física serán las únicas que, por vía de deduccion, logren arrojar alguna luz sobre estos misterios de la constitucion de la materia.

Miéntras tanto, es interesante en alto grado interrogar á la naturaleza en cuanto ofrece de perceptible á nuestros órganos. Los poros visibles nos han dado una idea de lo que son los poros invisibles. La estructura aparente de los sólidos, de los líquidos y de los gases podrá ayudarnos á comprender la estructura oculta de sus últimas moléculas, ó sea lo que un sabio contemporáneo ha llamado, valiéndose de una imágen atrevida, *la arquitectura de los átomos*.

Al estudiar los cuerpos sólidos, orgánicos ó inorgánicos, hay que empezar pues por distinguir las partes homogéneas de las que no lo son, y al decir esto nos referimos á la homogeneidad de estructura. Tan sólo se han de estudiar aisladamente las primeras, puesto que podemos considerar todo cuerpo de estructura heterogénea como si estuviese formado de partes homogéneas diferentes, agrupadas ó asociadas de cualquier modo. Consideremos ante todo los cuerpos inorgánicos. Estos presentan dos aspectos bien definidos, que permiten separarlos en dos distintas clases: á la primera corresponden los sólidos de estructura regular, geométrica ó cristalina; la segunda comprende los de estructura irregular ó amorfa.

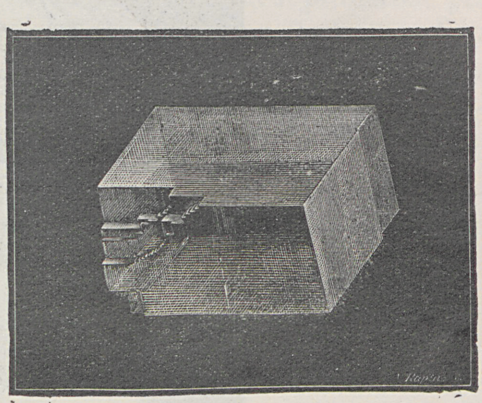


Fig. 15.—Espato de Islandia

A primera vista parece que los cuerpos sólidos que se encuentran en la naturaleza pertenecen en su mayoría á la segunda clase, y que los cristalizados son una excepcion, pero estudiando con más minuciosidad los numerosos minerales que constituyen la masa del suelo, se viene á reconocer que todos ó casi todos tienen,

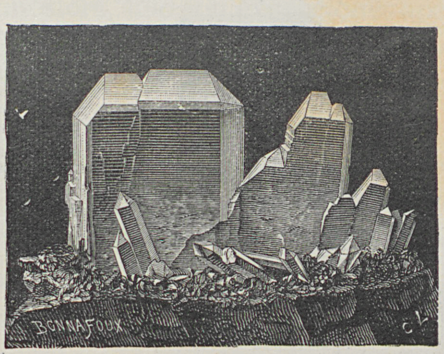


Fig. 16.—Cristales de cuarzo

ó pueden adquirir, en circunstancias particulares, una estructura cristalina. Muchos cuerpos que, en su apariencia ordinaria, parecen formados de materiales amorfos, irregulares, presentan, examinados con el microscopio, la forma de partículas geométricas, que son sin duda alguna residuos de cristales de mayores dimensiones. Examinando del mismo modo las roturas recientes de algunas rocas, se observa en sus bordes cierta estructura cristalina, de suerte que más bien puede decirse que los sólidos naturales amorfos son la excepcion y que la estructura

cristalina comprende la generalidad de las sustancias. No puede darse nada más interesante que el estudio de estas formas, consideradas primitivamente por antiguos físicos y naturalistas como juegos, como curiosidades ó caprichos de la naturaleza, y cuyas leyes descubrió el genio



Fig. 17. — Cristales de clorhidrato de amoniaco (Aumento = 12 diámetros)

de los Romé de Lisle, Bergmann y Hauy. La cristalografía es hoy una de las ramas de la ciencia más indispensables para los mineralogistas, físicos y químicos: ella nos enseña que esa

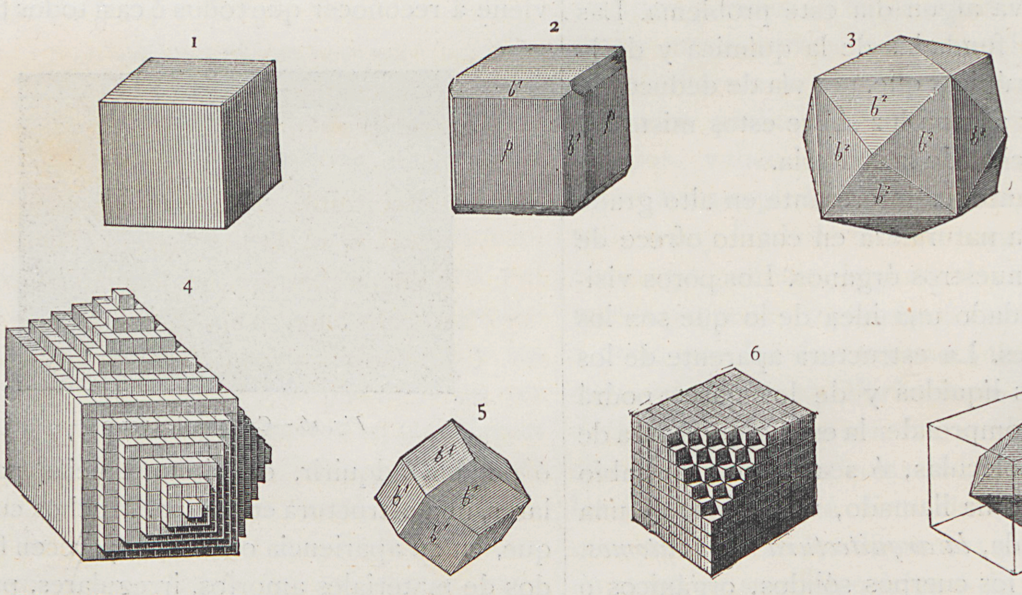


Fig. 18. — Cristal cúbico, formas primitivas y formas derivadas: 1, cubo primitivo; 2, cubo pasando el exatetraedro; 3, exatetraedro; 4, cubo dando el dodecaedro romboidal; 5, dodecaedro romboidal; 6, cubo pasando al octaedro; 7, octaedro

innumerable multitud de variadísimas formas que tienen los cristales naturales (figs. 15 y 16), ó los artificiales (fig. 17), puede reducirse á un corto número de tipos ó de formas simples, que con frecuencia se puede pasar de unas á otras mediante el *clivage*, operacion que consiste en separar las partes de un cristal en tenues partículas, en hojuelas cuya direccion está en relacion con la de las caras de cristal primitivo.

Más arriba presentamos algunas figuras así como unas cuantas formas derivadas. Fácilmente se echa de ver cómo unas pueden dar

orígen á otras, ya á causa de la alteracion de las caras, ó bien por la de las aristas. Por lo demás, los cristales distan mucho de presentar en la naturaleza la forma regular, ó más bien completa que el estudio ha hecho reconocer como elemento de la sustancia cristalina; la mezcla de los individuos, de forma y tamaño variados, produce una porcion de alteraciones que sólo son aparentes, lo cual es fácil de comprobar comparando entre sí las figuras representativas de los cristales naturales y de su forma geométrica.

Los modos de formacion de los cristales se reducen á dos ó tres á lo sumo. Todo cuerpo se cristaliza pasando del estado líquido al sólido; pero el estado líquido en sí se obtiene de dos maneras, segun que se emplee la accion del fuego, ó que la substancia cuya cristalizacion se quiera obtener se disuelva en un líquido á propósito; en el primer caso la cristalizacion se hace por vía de fusion ó por la *vía seca;* en el segundo, por la *vía húmeda.* Hay otro método que consiste en combinar los dos primeros; pero no podemos descender á detalles más minuciosos acerca de este asunto porque traspasaríamos los límites del plan que nos hemos propuesto. Repetimos que en todo lo que antecede no hemos tenido otro objeto sino el de dar una idea de la estructura molecular de los cuerpos, cuyas propiedades físicas pasaremos ya á estudiar.

CAPÍTULO II

LA GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

I

UNIVERSALIDAD Y CONSTANCIA APARENTE DE LA GRAVEDAD

Entre todas las fuerzas cuyos efectos estudian las ciencias físicas y naturales, no hay una sola que tenga una accion más constante y más universal al parecer que la gravedad.

Y ante todo más universal.

En efecto, todos los cuerpos que vemos y tocamos, y con los cuales tenemos más ó ménos relacion en la superficie de la Tierra, son pesados. Es un hecho práctico.

Una piedra ó cualquier otra masa sólida abandonada á sí misma en el aire desde cierta altura, se precipita, sin detenerse en su movimiento hasta que encuentra un obstáculo material, hasta que toca el suelo por ejemplo; un cuerpo de forma redonda, como una bola, rueda por un plano inclinado al horizonte; si es una masa líquida, como el agua de un arroyo ó de un rio, corre por la superficie que, formando cuesta, le sirve de lecho. En una palabra, todos los cuerpos sólidos ó líquidos, sueltos y sin sujecion alguna, propenden á moverse de arriba abajo, consistiendo la gravedad precisamente en esta propension. Nadie ignora que la tendencia opuesta, observada en los cuerpos sumergidos en un flúido más pesado que ellos, como la subida del corcho en el agua, el humo, el vapor en la atmósfera, sólo son excepciones aparentes, cuya explicacion, que veremos en breve, está basada precisamente en las mismas leyes de la gravedad.

¿Se ejerce tambien esta accion fuera de la Tierra, en el seno de los espacios celestes, influyendo en los cuerpos que pueblan estos espacios? Podemos asegurarlo, por más que no nos sea posible comprobarlo directamente; pero las deducciones de la teoría y del cálculo no permiten ponerlo en duda. Más adelante procuraremos hacer comprender cómo ha llegado á ser una de las verdades científicas más fundadas esta generalizacion, la conquista más atrevida de cuantas ha hecho la ciencia en el dominio del mundo físico.

Así pues, la fuerza que conocemos en la superficie del globo terráqueo con el nombre de *gravedad*, y que toma en el cielo el de *gravitacion*, cuando se ejerce en los astros, está universalmente difundida por la naturaleza.

Esto parece tan cierto, que á los ojos de muchas personas, las palabras gravedad y ma-

teria representan dos ideas inseparables, una de las cuales no se concibe sin la otra. Sin embargo, debemos hacer desde luégo una reserva necesaria por dos conceptos.

Ante todo, si por materia se entiende, segun la definicion generalmente adoptada, todo cuanto perciben nuestros sentidos, debemos decir que no toda materia es ponderable (1). ¿Hay que negar acaso el nombre de materia al medio que trasmite las radiaciones caloríficas y luminosas, y cuyos movimientos ondulatorios actúan directamente sobre nuestros órganos produciendo en ellos sensaciones de calor y de luz, en una palabra, al éter? Por la definicion misma, esto no nos parece posible. Y sin embargo, el éter es imponderable.

Por otra parte, si haciendo abstraccion del éter ó de cualquier otro agente ó medio análogo, tan sólo consideramos la materia de los cuerpos ponderables, de aquellos que la experiencia y la observacion nos dan á conocer en uno de los tres estados, sólido, líquido ó gaseoso, ¿es positivamente cierto que la gravedad, á la cual están todos indefectiblemente sometidos, persiste en ellos constante, invariable?

Esto no es exacto ni riguroso sino con una condicion: la de que dichos cuerpos permanezcan en el mismo lugar, á igual latitud y á idéntica altitud. Sólo en este caso es invariable el peso del cuerpo, resultante de las acciones de la gravedad sobre todas las moléculas que lo componen; sólo en este caso obra la gravedad con intensidad constante sobre una misma cantidad de materia. Trasportada esta cantidad de materia al interior de las capas profundas del suelo ó á diferente latitud ó á bastante altura en la atmósfera, variaria su peso, ya aumentando, ó bien disminuyendo; peso que seria muy distinto si se trasportara la masa, por hipótesis, á la Luna, al Sol ó á cualquier otro cuerpo celeste.

No es el peso ni la fuerza de gravedad lo invariable en un cuerpo, sino la masa, y por lo tanto á la masa deberíamos aplicar esta identificacion con lo que entendemos por materia.

(1) «El físico, dice Biot, basándose únicamente en la práctica, llama *cuerpo material* á todo lo que produce en los órganos cierto conjunto de sensaciones determinadas.» En este supuesto, el éter, cuyas ondulaciones se comunican á nuestros nervios sin que intervenga ninguna otra sustancia material, debe figurar entre los cuerpos materiales. En todo caso el éter es materia.

Haciendo estas reservas importantes, que expondremos más adelante con mayor precision, fácilmente se deduce en qué sentido debe comprenderse que la gravedad es constante y universal; ningun cuerpo se sustrae jamás á la accion de esta fuerza. No sucede lo propio con otras fuerzas físicas, como la causa de la luz ó del calor, la de la electricidad, la del sonido, etc., pues la experiencia nos demuestra que estas fuerzas se manifiestan con fenómenos por lo regular intermitentes, y á menudo variables. Y esta es sin duda una de las razones por las que, en las cátedras y en los tratados de física, el profesor ó el autor empieza siempre por tratar de los fenómenos y leyes de la gravedad.

II

IDEAS QUE TENIAN LOS ANTIGUOS ACERCA DE LA GRAVEDAD

> «No sin razon se asombran los filósofos cuando ven caer una piedra, y el pueblo, que se rie de su asombro, participa de él muy pronto, por poco que reflexione.»
> (D'ALEMBERT, *Enciclopedia.*)

Hay sin embargo otra razon para que se haya adoptado generalmente este órden, y es que de todas las partes de la física, la ciencia de la gravedad fué la primera en llegar á constituirse, de lo cual no hace mucho tiempo, por cuanto los experimentos de Galileo sobre el péndulo y sobre la caida de los graves apénas datan de tres siglos. Seria sin duda exagerado decir que entónces se sustituia por vez primera, á los *à priori* de la escolástica, el método seguro y fecundo de la observacion experimental, puesto que mil ochocientos años ántes Aristóteles habia dado un memorable ejemplo, poco seguido por desgracia. Pero de todos modos, hay que remontar á los últimos años del siglo XVI la física moderna y las primeras observaciones, los primeros experimentos que han proporcionado al cálculo elementos bastante exactos para servir de bases sólidas á la teoría de la gravedad.

Anteriormente á Galileo, repetíase en las escuelas todo cuanto Aristóteles habia escrito acerca de la gravedad en su tratado *de Cœlo*, esto es, una porcion de fórmulas vagas, huecas cuando no falsas, y en verdad que lo eran con frecuencia. Como seria enojoso repetirlas, áun resumiéndolas, nos limitaremos á tomar nota de algunos de sus principales puntos.

Para Aristóteles como para muchas personas que no tienen ninguna nocion de física, la gravedad y la ligereza eran cualidades que pertenecian exclusivamente á ciertas sustancias. Es *pesado* todo cuanto va á parar al centro, y entendia por esto el centro del mundo ocupado por la Tierra; es *ligero* todo lo que se aleja del centro. La *tierra* (uno de los cuatro elementos, en el que estaba resumida la solidez) es pesada; el *fuego* es ligero, porque el fuego se dirige naturalmente fuera del centro, hácia arriba, hácia la circunferencia ó el cielo. Por lo que hace á los elementos intermedios, el agua y el aire (es decir, los líquidos y los gases: el fuego era para los antiguos de naturaleza puramente especial) no son ligeros ni pesados de una manera absoluta; son una mezcla de ligereza y gravedad, en la que predomina tan pronto una como otra cualidad; así, el agua, pesada en el aire, es ligera en la tierra, etc. (1)

Para los antiguos no era cosa desconocida la aceleracion de la caida de los graves: habian observado, aunque sin medirla, la velocidad creciente de un cuerpo que cae en el aire. Aristóteles dice claramente: «La tierra (el elemento sólido) está animada de un movimiento tanto más rápido cuanto mayor es su proximidad al centro (2).» Verdad es que dice lo propio del fuego, «á medida que se acerca á lo alto,» y que nada prueba que los antiguos tuvieran una idea perfectamente definida de esta aceleracion; probablemente la atribuian al peso del cuerpo, como parece probarlo este otro período: «..... Así como el cuerpo arrastrado por su velocidad más abajo que otro *adquiere velocidad por su propio peso.*» Por lo demás, admitian, y persistieron en este error hasta Galileo, que la velocidad de la caida era proporcional á las masas. «Una masa mayor de tierra, dice Aristóteles, va tanto más de prisa al sitio que le es propio.» Sin embargo, Lucrecio sugirió por primera vez la idea de que la diferencia de velocidad de los cuerpos de masas iguales que caen de la misma altura, procedia de la resistencia del aire; y hablando del movimiento de los átomos, dice que «todos deben caer con igual velocidad en el vacío, aunque sus pesos sean desiguales (3).»

Por lo que respecta á la idea de que los cuerpos celestes se hallaban asimismo sometidos á la gravedad, estaba en contradiccion con los sistemas de los antiguos, quienes consideraban la sustancia de dichos cuerpos como un fuego puro, como un elemento incorruptible. Cítase sin embargo la opinion de Anaxágoras, quien, habiéndole llamado la atencion la caida de un aerolito, consideraba los astros como cuerpos pesados, que si no caen en la Tierra es por impedírselo la rapidez del movimiento circular y no otra cosa. Tambien Plutarco expresa claramente esta idea en su *Vida de Lisandro*, la cual se lee asimismo en el siguiente párrafo de la obra titulada *De facie in orbe Lunæ:* «Pero la Luna tiene un auxiliar contra la fuerza que la arrastra á caer; este auxiliar es su movimiento mismo, y la rapidez de su revolucion, del mismo modo que la piedra puesta en una honda no puede caer, á causa del movimiento giratorio que la impulsa.»

La caida de una piedra, el movimiento periódico de una plomada que oscila alrededor de su punto de suspension, una columna de humo ó de vapor que se eleva por los aires, ó un pedazo de corcho que se suelta desde el fondo de una vasija y remonta á la superficie del líquido en que está sumergido, son cosas tan sencillas, casi diríamos tan pueriles, que nos inclinamos naturalmente á considerarlas como necesarias. ¿Quién piensa en averiguar por qué pesan los cuerpos, cuál es la causa de su caida, de su ascension al aire ó en el agua, de la presion que ejercen en los otros cuerpos en que se apoyan? ¿Quién no atribuiria á milagro el que una masa de materia sustraida á la accion de la gravedad, persistiese en permanecer en el aire cuando se la abandonara á sí misma?

La generalidad de las gentes justificarian la observacion de d'Alembert con que encabezamos este artículo, si se les dirigieran semejantes preguntas. Sin embargo, no deja de admirarse el

(1) No podemos ménos de reparar, haciendo las reservas necesarias, en la analogía de esta clasificacion de la materia por los antiguos con la de los sabios modernos. Ahora decimos los sólidos, los líquidos, los gases, el éter. Pero es cierto que los tres estados no son elementos para nosotros.

(2) Virgilio ha dicho, hablando de la Fama que vuela por los aires:
Mobilitate viget, viresque adquirit eundo
Este verso pinta admirablemente el movimiento acelerado de un cuerpo que cae.

(3) Omnia quapropter debent per inane quietum
Atque ponderibus non æquis concita ferri.
(*De natura rerum*, II)

que por primera vez ve el movimiento que arrastra una partícula de hierro hácia el polo de un iman, ó la repulsion que este mismo iman ejerce en una de las puntas de una aguja imantada; y áun cuando estemos ya acostumbrados á estas atracciones y repulsiones, ¿no es verdad que nuestra mente queda suspensa ante semejantes fenómenos? Entónces deseamos conocer la fuerza misteriosa que los engendra, el invisible vínculo que une á larga distancia el polo de un iman con la masa de hierro por él atraida, la punta de la aguja de la brújula con el punto del globo terráqueo hácia el cual se dirige. No es posible impedir que la imaginacion trate de sondear tan singular fenómeno, ni que se busque su causa.

Pues bien, á ménos de haber estudiado, reflexionado largo tiempo, nadie se ocupa en hacer averiguaciones análogas sobre la caida de un cuerpo, de esa atraccion no ménos misteriosa que precipita al suelo toda masa material, haciéndola seguir una direccion invariable como la de la aguja magnética. ¿Qué motivo hay para semejante diferencia? ¿No se encuentra la mente en uno y otro caso en presencia de fenómenos que, desde el punto de vista científico y filosófico, pertenecen seguramente al mismo órden, siendo tan asombroso el uno como el otro? Esto nos parece por demás evidente. Sólo que los fenómenos de la gravedad parece que afectan universalmente á todos los cuerpos, á todas las partículas de materia que encontramos en la superficie del globo terráqueo, y los hacemos de buen grado extensivos á todos los cuerpos que, en razon de su distancia, escapan á nuestra observacion directa. Por el contrario, la imantacion, los fenómenos de repulsion ó de atraccion magnética son relativamente raros, parecen exclusivos de una sola especie de sustancias poco difundidas por la naturaleza, ó bien requieren preparaciones especiales, cuando se los quiere obtener artificialmente. En una palabra, los fenómenos magnéticos, casi desconocidos del vulgo, nos sorprenden precisamente por manifestarse como aparentes exenciones de la ley general de la gravedad.

Así pues, es interesantísima la solucion de este problema: ¿Por qué caen los cuerpos? O en otros términos: ¿Qué es la gravedad ó cuál es la causa de la gravedad? No está probado que la ciencia se halle aún en disposicion de resolver semejante problema. Las causas de los fenómenos se eximen de nuestra investigacion; harto hemos conseguido con obtener todas sus particularidades, y mucho más con determinar sus leyes; todo cuanto podemos hacer es referir estas leyes múltiples á una ley más particular, cuyo principio consideramos como causa de todos los casos particulares.—Pues esto precisamente es lo que ha sucedido respecto á la gravedad. En vano se han venido haciendo por espacio de largo tiempo muchas especulaciones, porque no se estudiaban ó no se observaban los fenómenos como era debido. Poco á poco se ha llegado á conocerlos mejor, á averiguar y formular sus leyes, se han aplicado estas, y en virtud de una generalizacion atrevidísima, se han relacionado los fenómenos de la gravedad terrestre con los movimientos de los astros. De la gravedad se ha venido á parar á la gravitacion universal.

Para resolver cuestiones tan importantes, ha habido que desechar hipótesis estériles, observar y experimentar en vez de suponer. La cuestion de: ¿por qué caen los cuerpos? ha sido afortunadamente sustituida por esta otra más sencilla y sobre todo más accesible: ¿cómo caen los cuerpos? Y sin embargo de restringirla de tal suerte, la cuestion no parecia de solucion fácil.

En un principio se tropezaba con dificultades, por decirlo así, insuperables.

Actualmente, se considera la gravedad como propiedad de toda materia, si no esencial, por lo ménos general, ó mejor dicho, universal. Pero en la antigüedad y hasta la época de Galileo, esto es, hasta el nacimiento de la física experimental, se establecian distinciones entre los cuerpos: veíase caer á los unos, y á los otros por el contrario elevarse; habia pues cuerpos *pesados* ó *graves* y cuerpos *ligeros* en absoluto. Anteriormente hemos visto que así los consideraba Aristóteles.

Estas ideas nos parecen hoy raras y pueriles. ¿Eran acaso otra cosa sino una defectuosa interpretacion de hechos mal observados, una mezcla incoherente de ideas justas y de hipótesis arbitrarias? En la teoría de Aristóteles sobre la gravedad habia nociones exactas, entre otras la que la definia diciendo que era la tendencia

que tienen los cuerpos pesados á dirigirse al centro de la Tierra, de cuya esfericidad era partidario el célebre filósofo. Pues bien; la ignorancia y la preocupacion han venido rechazando una y otra verdad por espacio de muchos siglos. ¿Cómo conciliar la forma redondeada de la Tierra, su aislamiento en el espacio, con la universalidad de la gravedad en su superficie? ¿Cómo es posible que la reunion de todos los cuerpos pesados, que el mismo punto de apoyo no caiga, si dicha masa está aislada, sin nada que la sostenga? Los hombres, hasta los que pasan su vida estudiando, si bien más á menudo en los libros que en la naturaleza, han sido niños largo tiempo: ¿cuántos lo son aún? Pregúntese á un muchacho que ya reflexione, ántes que su profesor le haya inculcado semejantes nociones, trátese de hacerle comprender que la Tierra es redonda, y que en todo su contorno está constituida del mismo modo, con el agua, el mar, los rios, las rocas y las montañas en su superficie; dígasele que en todas partes está habitada por hombres y animales. ¿Cómo puede ser, objetará (¡cuántas veces hemos oido la misma objecion á personas mayores!) que esos hombres se sostengan con los piés arriba y la cabeza abajo, que el agua no se desparrame por el aire?..... Es la famosa cuestion de los antípodas, tan controvertida en la Edad media, y que no ha sido definitivamente resuelta hasta que se han tenido pruebas palpables de ella, hasta que se ha contado con los testimonios de los viajeros y marinos que efectuaron los primeros viajes de circumnavegacion.

Así sucede con todas las verdades del órden científico. Una vez demostrada la redondez de la Tierra, hubo que rendirse á la evidencia, y admitir que todas las direcciones de la gravedad convergen en el centro del globo. Dióse una interpretacion más general á la palabra *caer;* lo *alto* y lo *bajo* fueron expresiones puramente relativas. Siendo la Tierra esférica, ó por lo ménos esferoidal, todas las partículas materiales se dirigen hácia un punto interior, hácia su centro, por efecto de la gravedad. Allí se encuentra el asiento aparente ó real (poco importa) de una fuerza que obliga á todo átomo á encaminarse hácia dicho punto siguiendo una línea recta (la vertical), si no hay nada que se oponga á su movimiento, y si este movimiento no resulta imposible por la interposicion de algun obstáculo que le obligue á ejercer una presion en el mismo sentido.

Esta verdad nos parece hoy tan sencilla, que casi estaríamos tentados á considerarla pueril, mas si bien se reflexiona, no cabe duda de que es una de las grandes conquistas de la física experimental, por cuanto ha destruido una opinion falsa, una preocupacion tan arraigada en la mente de los sabios antiguos como en la de los ignorantes de todas épocas.

III

LOS FENÓMENOS DE LA GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

Se puede definir la gravedad diciendo que es la causa de la caida de los cuerpos abandonados á sí mismos, en el vacío, en el aire ó en un flúido de menor densidad; pero se la podria definir tambien diciendo que es la fuerza en virtud de la cual los cuerpos en reposo ó en equilibrio comprimen á los que les sirven de apoyo. Estos dos modos de accion corresponden á los términos de *fuerza viva* y de *fuerza muerta*, términos que, segun la expresion de d'Alembert, «distinguen la fuerza de un cuerpo en movimiento de la de otro cuerpo que sólo tiene tendencia á él.»

Se puede hacer patente la presion de que hablamos y medirla valiéndose de la tension de un muelle; nuestros órganos la advierten á causa del esfuerzo que han de hacer para sostener ó mantener en equilibrio los cuerpos pesados, como por ejemplo, cuando levantamos y sostenemos una piedra con la mano. Tomemos una masa sólida, un pedazo de plomo ó de hierro, y suspendámosle de la punta inferior de un hilo, de una cuerda flexible cuyo extremo superior sujetamos de cualquier modo; el hilo ó la cuerda permanecerán estirados ó en línea recta, ya esté el sistema en equilibrio ó no; esta tension, que subsiste miéntras el hilo no se rompe ó no lo cortan, es otro modo de accion de la gravedad y un testimonio de la continuidad de esta accion.

La caida vertical de una masa sólida, la presion ejercida por un cuerpo en su punto de apoyo, y el movimiento oscilante de una masa pesada suspendida de un hilo desviado de la vertical, son en su forma más simple los fenó-

menos derivados de la gravedad y de cuyas leyes, rigurosamente deducidas de la observacion experimental y del cálculo, se han sacado tan importantes consecuencias relativas al órden del universo. En los siguientes capítulos expondremos las unas y las otras; pero ántes no carecerá de interés que resumamos en breves líneas las variadísimas formas con que la gravedad se presenta al observador en la superficie del globo terráqueo, en sus relaciones necesarias con la accion de otras fuerzas naturales.

Puesto que todas las moléculas materiales, sólidas, líquidas ó gaseosas, que forman los cuerpos de que se compone la masa de la Tierra, tanto en su superficie como en las profundidades de sus capas internas y en las alturas aéreas de su atmósfera, están sujetas á la accion continua de la gravedad, claro está que esta fuerza ha desempeñado y desempeña todavía un papel preponderante en el estado general de equilibrio que afecta á dicha masa. La porcion del armazon terrestre accesible á la observacion, es decir, el conjunto de las capas sólidas que constituyen su corteza, forma un todo casi permanente, estable, prescindiendo de algunas variaciones muy lentas ó sean los movimientos de oscilacion secular comprobados por los geólogos en varias naciones. Esta estabilidad relativa es el resultado de las presiones mutuas procedentes de la fuerza de la gravedad ejercida entre todas las partículas materiales del globo, pero que se pueden considerar como teniendo su resultante en el centro de este. Mas por un lado contrabalancea esta tendencia la reaccion de las masas sólidas contra una compresion indefinida, y por otro la fuerza centrífuga ocasionada por el movimiento del globo sobre su eje.

Si parece demostrado que la Tierra fué flúida en su orígen, primeramente en estado de nebulosa difusa, para condensarse despues en un núcleo líquido; si es probable que se hayan necesitado millones de años para que se efectuaran las condensaciones sucesivas en virtud de las cuales el globo ha llegado á ser lo que hoy es; si por último estas condensaciones proceden del enfriamiento gradual de la masa, vése que el génesis del globo es resultado de dos fuerzas opuestas, una de las cuales propendia á la reunion, á la condensacion de las moléculas de la nebulosa primitiva, y la otra, por el contrario, á la expansion, á la repulsion. La primera de estas fuerzas es la gravedad, la segunda el calor.

Pero esta lucha no ha terminado todavía, como lo prueban los movimientos frecuentes de trepidacion conocidos con el nombre de terremotos, así como las erupciones de los volcanes, erupciones que en los unos son de lava, en los otros de materias fangosas, surtidores de capas acuosas, como las columnas líquidas de los géiseres de Islandia, ó las masas surgientes del valle de Firehole (véase el grabado siguiente).

Todavía no se sabe positivamente cuál es el estado físico del núcleo interior del globo en las profundidades á que no han podido llegar los trabajos de las minas. Como tampoco se ha podido averiguar dicho estado por la experiencia, los físicos y los geólogos profesan hoy dos teorías opuestas, y al paso que unos insisten en admitir la fluidez de ese núcleo, la incandescencia de que está formado, los otros consideran el globo como solidificado hasta las tres cuartas partes, por lo ménos, de su núcleo, á partir del centro, ó no creen que haya capas flúidas continuas. Ya veremos, sin embargo, que se puede afirmar que la disposicion de las capas del núcleo ha tenido lugar siguiendo el órden de densidades, es decir, que las más pesadas están en el centro, y las más ligeras en la superficie, condiciones que la experiencia ha demostrado ser necesarias para la estabilidad de los líquidos, para su equilibrio bajo la accion de la gravedad,

Y en efecto, este es precisamente el órden de sucesion de los materiales que componen las partes del globo accesibles á la observacion. En la base, la materia *sólida* ó *suelo;* sigue luégo en las tres cuartas partes de la superficie, á profundidades variables, la parte *líquida* ú *océano;* y por último, sobre las tierras y los mares, las sustancias *gaseosas* ó *aire.*

Estas diferentes partes pesan unas sobre otras, comprimiendo cada capa la que tiene inmediatamente debajo. Pero si el suelo y las capas subyacentes se hallan en un estado casi permanente de equilibrio, gracias á la cohesion molecular que constituye la solidez, no sucede lo propio con la parte líquida, cuyas capas superiores están constantemente agitadas por las mareas, los vientos y las corrientes, ni con la parte gaseosa ó atmósfera, perturbada sin cesar por la accion continua y variable de agentes distintos



LA GRUTA

Géiseres del valle de Firehole (Estados-Unidos)

de la gravedad. Si no influyera ni actuara ninguna causa exterior en el agua de los mares y de los lagos, esas masas líquidas permanecerian tranquilas en sus lechos, en sus cuencas; pero las variaciones de temperatura, la accion de los vientos, la de las mareas luni-solares producen movimientos irregulares y oscilaciones periódicas, de los que resulta, en vez del reposo, una agitacion perpetua. A decir verdad, el equilibrio constantemente perturbado se recobra constantemente ó á lo ménos se mantiene entre límites restringidos que dependen de la densidad de las aguas del mar, de los roces que sufren sus moléculas. Y, circunstancia notable, habiendo querido averiguar Laplace cuáles son las condiciones de la estabilidad del equilibrio de los mares, vió que bastaba que la densidad de las aguas del Océano fuese menor que la de la Tierra, condicion que precisamente se realiza en la naturaleza; si las aguas del mar fuesen más ligeras, estarian en perpetua movilidad; si más pesadas, las desviaciones de equilibrio producidas por causas accidentales podrian llegar á ser muy grandes y ocasionar en los continentes é islas espantosas catástrofes.

Donde la lucha de las fuerzas opuestas ocasiona variaciones más rápidas y de mayor extension es en la atmósfera. Supongamos las masas flúidas del aire sometidas únicamente á la gravedad, la calma más profunda reinaria perpetuamente en ellas; todas las capas del aire superpuestas con arreglo á un órden de densidad decreciente subsistirian en equilibrio permanente, apoyadas unas en otras y en el suelo por efecto de sus mutuas presiones. Sin embargo, tendrian sus mareas como el océano, y las únicas corrientes que en ellas se observarian procederian de las desiguales resistencias que los relieves continentales opondrian á la propagacion de la onda gaseosa, y quizás tambien de los movimientos que la onda líquida de las mareas oceánicas causaria en las capas aéreas situadas sobre ellas. Semejante equilibrio está en realidad constantemente roto por la accion sin cesar variable del calor solar, que cambia el estado barométrico, térmico y eléctrico, suscita corrientes ascendentes y descendentes y todos esos diferentes fenómenos cuyo conjunto es objeto de la parte de la física del globo conocida con el nombre de meteorología. Por lo demás, como de influir la accion de la gravedad en las capas gaseosas de la atmósfera, ningun obstáculo se opondria á la expansion indefinida de esta, la atmósfera terrestre desapareceria en breve, disipada en el espacio por la fuerza centrífuga engendrada por el movimiento de rotacion de la Tierra. Por consiguiente, la gravedad es la que mantiene el equilibrio en la superficie de nuestro planeta y la que lo restablece cuando la accion de otras fuerzas físicas lo han perturbado.

Citemos todavía otros ejemplos de esa lucha incesante de la que nace el órden que impera en los fenómenos del mundo físico terrestre, lucha sin la cual todo seria reposo, silencio perpetuo, en una palabra, carencia de movimiento, es decir, de vida, ó por el contrario, el cáos resultante de una instabilidad sin límites.

Es sabido que la fuerza calorífica de los rayos solares produce la incesante evaporacion de las capas superficiales de los mares y de cualquier otra masa líquida sometida á su accion. El vapor así formado se eleva por el aire, gracias á la menor densidad de sus moléculas comparada con la del aire ambiente; y este movimiento ascensional lo produce la presion de las capas aéreas, ó lo que es lo mismo, es un efecto de la gravedad. De aquí nacen, en virtud de una condensacion cuyas causas se han estudiado, las nubes, luégo los movimientos de éstas, ocasionados por corrientes de orígen variable, y por último, las lluvias, las nieves, los granizos, etc., en suma, el regreso de las aguas evaporadas á la superficie del suelo. Una parte de las aguas de lluvia precipitadas de tal suerte por la accion de la gravedad, corre por las pendientes de los terrenos y forma arroyos, riachuelos y rios; otra parte filtra en el suelo y da orígen á las corrientes subterráneas, á los manantiales, etc.; de modo que tambien es la gravedad terrestre la que vuelve las masas líquidas al Océano, su depósito comun.

Y en esta circulacion periódica y continua á la vez, cuyo orígen es la radiacion solar ó el calor, por una parte, y la gravedad por otra, ¡cuántos fenómenos curiosos y variados ocurren, que tienen su asiento en el seno de la atmósfera ó bien en la superficie del suelo, y que seria prolijo describir! Concretémonos á citar algunos de los más notables, en los que la fuer-

za de la gravedad interviene con sorprendente y destructora pujanza. La accion de las aguas en el suelo, repetida sin tregua por espacio de largas acumulaciones de siglos, ha abierto los cauces de los rios, corroe diariamente sus ribazos y arrastra los materiales disgregados formando más léjos terraplenes, bancos de arena ó de limo. La filtracion de las aguas pluviales en el suelo, filtracion dimanada de la gravedad, cuando ménos en gran parte, disgrega los terrenos y las rocas, con frecuencia los socava y ocasiona así los derrumbamientos que desnudan las laderas de las montañas y colinas y que á la larga ciegan los valles, trabajo de disgregacion que á menudo pasa desapercibido hasta el dia en que ocurre la catástrofe: entónces considerables masas de rocas, minadas por su base, pierden de pronto el equilibrio, y resbalando ó despeñándose, destruyen todo cuanto encuentran á su paso. Así es cómo montañas enteras han sepultado pueblos y ciudades bajo sus escombros, y la historia consigna numerosos ejemplos de tan terribles acontecimientos. En el siglo XIII, el monte Grenier, cuya cumbre descuella todavía entre las montañas que ciñen al Sur el valle de Chambery, se derrumbó en parte, y sepultó el pueblo de San Andrés y muchas aldeas; todavía se enseñan al viajero los *abismos de Myans*, bajo los cuales yacen las ruinas y las víctimas. En 1806, ocurrió un derrumbamiento por el estilo desde las vertientes del monte Ruffi, en el valle de Goldau, habiéndose precipitado una masa enorme de rocas que sepultaron asimismo muchas aldeas y cegaron gran parte de una laguna inmediata. Seria supérfluo demostrar por medio de cálculos cuál es la fuerza destructora de semejantes masas, precipitadas por la gravedad desde una altura á las veces asombrosa, y cuya velocidad aumenta con la distancia.

Los aludes ó avalanchas son fenómenos de la misma clase, siquiera mucho más frecuentes que los desprendimientos de rocas y montañas. Las masas de nieve, acumuladas en la vertiente inclinada de una montaña ó al borde de un precipicio, resbalan á impulso de su propio peso, y luégo se desprenden y caen, arrasándolo todo en su caida. A veces basta un leve choque, un pistoletazo, hasta un grito, para causar la rotura de equilibrio y dar orígen al fenómeno. En los icebergs, ó montañas de hielo de las regiones polares, la presion de unos témpanos sobre otros ocasiona fenómenos análogos, en los que la fuerza irresistible de la gravedad manifiesta tambien su pujanza. Los glaciares, esos rios de nieve solidificada que ha pasado al estado de hielo compacto, descienden poco á poco empujados por el peso de las capas superiores que los forman; y este movimiento de progresion lenta es tan enérgico, que la masa cristalina y las piedras y guijarros por ella acarreados llenan de estrías y alisan las rocas laterales y subyacentes (1).

En las erupciones volcánicas, las fuerzas explosivas de los gases interiores suelen lanzar á la atmósfera cenizas, fragmentos de piedras y verdaderas rocas. Pero si estas masas se sustraen en la apariencia por algunos instantes á la accion de la gravedad, la lucha de las dos fuerzas no es de larga duracion, y obedeciendo los proyectiles á la incontrastable ley de todos los cuerpos terrestres, vuelven á caer en la superficie de la tierra.

Todos estos casos son tan conocidos, están tan al alcance de la observacion de todo el mundo, que seria casi pueril recordarlos á no ser por el interés que ofrecen relativamente á la física terrestre ó á la historia de nuestro planeta. Y en efecto, ¿no es curioso presenciar, siquiera mentalmente, el espectáculo de los cam-

(1) Cuando nos trasladamos con el pensamiento á las remotísimas épocas en que los continentes actuales se formaron, en que se modeló el relieve de las cordilleras de diversas edades, deseamos averiguar cuáles fueron las fuerzas internas capaces de levantar esas masas, venciendo la accion siempre presente de la gravedad. ¿Por qué no se ha formado el suelo de estratos horizontales, regulares, nivelados, indicio de un equilibrio que se habria establecido poco á poco siguiendo las leyes de la estática de los cuerpos sólidos ó líquidos? ¿Las fuerzas internas de que hablamos lograron vencer la gravedad terrestre mediante una accion brusca ó en virtud de levantamientos pausados y progresivos? En todo caso, aquella recobra poco á poco su preponderancia y reconquista su imperio. Aprovéchase de todo cuanto desprenden de las rocas los agentes atmosféricos, el calor solar y la humedad; de la disgregacion incesante que es su consecuencia, para acarrear esos residuos por mil arroyuelos desde las cumbres de las montañas á los rios de segundo órden, luégo á los de primero, y por último al mar. De este modo destruye la gravedad poco á poco cuanto las fuerzas opuestas habian sustraido á su accion, y con el tiempo borra esos relieves. Por otra parte, el empuje continuo de las mareas conmueve las peñas de las costas, y las socava poco á poco, siendo tambien la gravedad, aunque por distinta manera, la que contribuye á devolver á la Tierra su nivel primitivo. Acumulando los millones de años en que esto viene sucediendo, se podria calcular la época en que quedará terminada semejante obra de nivelacion, suponiendo sin embargo que las fuerzas enemigas ó internas no contrabalanceen la gravedad y levanten otras islas en el seno del océano, formando así nuevos continentes y nuevas cordilleras.

bios que casi de continuo ocurren en la estructura exterior del planeta por efecto de la accion de las fuerzas opuestas, de las que sólo hemos hecho una imperfecta enumeracion? La influencia de los agentes meteóricos destruye poco á poco la obra de las reacciones producidas seguramente por el calor interno, es decir, el levantamiento de los relieves continentales, de las cadenas de montañas y de los conos volcánicos. Los fragmentos de este relieve se dislocan, se desmoronan lentamente, de siglo en siglo, y semejante dislocacion en que, segun hemos visto, interviene de un modo activo la gravedad terrestre, se acrecienta además por la accion de la gravedad de la Luna y del Sol, la cual produce los fenómenos periódicos de las mareas. Dia llegará quizás, en que la ciencia haya hecho tales progresos, que se podrá leer á la vez en el pasado del planeta y adivinar alguna de sus futuras trasformaciones.

Miéntras tanto no debemos considerar tales hipótesis sino como simples conjeturas, cuyo grado de probabilidad estará en relacion con la suma de los hechos positivos y de las leyes establecidas que les servirán de base. Por lo que respecta á los hechos y á las leyes de la gravedad, puede asegurarse que no queda mucho que desear en punto á precision y á demostracion práctica ó teórica, como procuraremos exponerlo con toda claridad en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO III

LEYES DE LA GRAVEDAD.—CAIDA DE LOS CUERPOS

I

LA PLOMADA—LA VERTICAL

Un hilo fino y flexible, sujeto á un punto fijo por su extremidad superior, y del que pende una masa bastante pesada para tenerlo tirante, se mantiene en equilibrio despues de oscilar un poco: este hilo es la *plomada*, de uso tan general en las artes y oficios.

Si el aire ambiente está tranquilo, si no influye en la plomada más fuerza que la gravedad, su direccion marca la de la gravedad misma, destruida por la resistencia del hilo.

Nadie ignora que esta direccion, en un lugar cualquiera de la superficie del globo, es lo que se llama la *vertical* del lugar. Supongamos que se corta el hilo; en este caso el cuerpo suspendido caerá siguiendo la prolongacion de la vertical.

Supongamos ahora que la plomada está suspendida sobre una superficie líquida en reposo, por ejemplo, sobre un baño de mercurio, en el cual se refleja la imágen de aquella; en virtud de un experimento muy sencillo, hecho con otra plomada que el observador tiene en la mano, se demuestra que las dos líneas formadas por la plomada misma y por su imágen reflejada están en la prolongacion una de otra, sea cualquiera la direccion en que se efectúe la visual (fig. 19). Resulta de aquí y de las leyes de la reflexion de la luz, que la direccion de la plomada es perpendicular ó normal á la superficie del líquido. Por lo demás este resultado es, como se verá más adelante, una consecuencia de las condiciones de equilibrio de una masa líquida sometida á la sola accion de la gravedad.

Unos resultados de observacion tan sencillos, tan fáciles de verificar, han debido ser conocidos en todo tiempo, como en efecto lo han sido, y así lo demuestran las aplicaciones que se les ha dado en las artes de construccion desde la más remota antigüedad. La direccion constante de la vertical en un sitio dado, perpendicular ó normal al horizonte de este sitio, los puntos opuestos del cielo por donde pasan las prolongaciones de esta vertical, llamados zenit el de arriba y nadir el de abajo, son nociones y términos tan conocidos que es inútil que nos detengamos á explicarlos.

Lo que no se sabe tanto, lo que se ignoraba

en las épocas en que no se tenia idea de la forma esférica, ó mejor dicho, esferoidal de la Tierra, es que las verticales de diferentes lugares no son paralelas, sino que forman entre sí ángulos tanto mayores cuanto mayor es la distancia

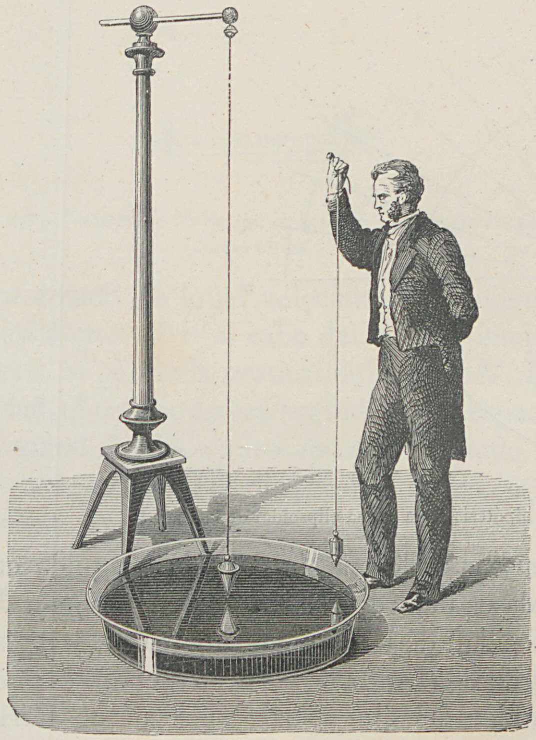


Fig. 19.—Direccion de la plomada perpendicular á la superficie de un líquido tranquilo.

que media entre dichos lugares (fig. 20). Cuando las distancias son cortas, es difícil de comprobar esta falta de paralelismo. Dos verticales cuyas bases estén separadas 31 metros en sentido horizontal no forman más que un ángulo de un segundo (1″); siendo menester que los instrumentos de medicion sean de una precision extraordinaria para poder determinar una distancia tan insignificante. Pero á 1,860 metros de distancia las verticales forman ya un ángulo de *un minuto;* y finalmente, para que este ángulo sea de un grado es preciso que entre vertical y vertical medie una separacion de 111 kilómetros. Cuando los dos puntos están en un mismo meridiano ó sea igual longitud geográfica, la diferencia de sus latitudes ó su suma (1) es la que da el ángulo de las verticales, y entónces el cálculo es muy sencillo; pero si ocupan diferente longitud, este cálculo es ya más complicado. Presentemos dos ejemplos: La vertical que pasa por el remate de la linterna del Panteon y la que va á parar á la flecha de la catedral de San Dionisio, forman ya el ángulo, pequeño pero apreciable, de 5′ 25″. De Paris á Dunkerque resultan 2° 12′ como separacion de las direcciones de la gravedad en cada uno de estos puntos.

Compréndese que existe una relacion entre las dimensiones y la forma de la Tierra, ya sea en el sentido de sus meridianos, ó ya en el de sus paralelos, y las variaciones de direccion de las verticales, es decir, de la direccion de la gravedad en cada uno de los puntos de su superficie. En virtud de una aproximacion bastante rudimentaria se supuso antiguamente á la Tierra esférica; en tal hipótesis, todas las verticales convergian hácia el centro de la esfera.

Esta era ya la opinion de Aristóteles, para quien el centro de la Tierra era el centro del mundo; así es que definia la gravedad diciendo que consistia en la propension que tienen los cuerpos graves á reunirse en el centro (2). Las mediciones de los geodestas modernos han modificado poco á poco este modo de ver. Háse reconocido primeramente el aplanamiento de la esferoide terrestre en sus dos polos de

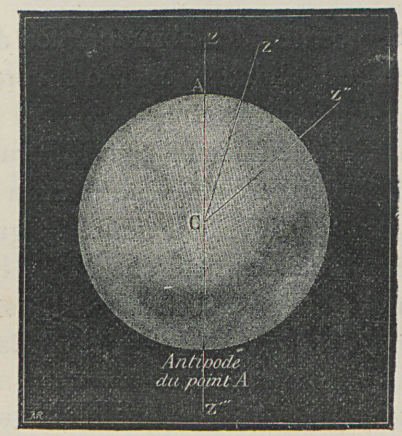


Fig. 20.—Convergencia de las verticales hácia el centro de la Tierra

rotacion, y asimilado sus meridianos á elipses iguales, y su ecuador y los paralelos á círcu-

(1) Segun que los dos lugares estén al norte ó bien al sur del Ecuador, ó el uno en el hemisferio boreal y el otro en el austral.

(2) «Los cuerpos graves se dirigen al centro de la Tierra, pero indirectamente, y sólo porque esta tiene su centro en el centro del mundo. La prueba de que los cuerpos graves se dirigen al centro de la Tierra está en que los que caen en su superficie *no siguen líneas paralelas,* sino que descienden describiendo ángulos iguales. Por consiguiente, estos cuerpos van á parar á un centro único, que es asimismo el centro de la Tierra. (Aristóteles, *De Cœlo.)*

los (1). Despues, mediante un estudio más riguroso, que dista mucho de estar terminado, se han descubierto anomalías é irregularidades de forma, ya en los meridianos ó bien en los paralelos. Más adelante veremos que la vertical sufre desviaciones locales cerca de las montañas y de las grandes moles continentales, desviaciones que se ha podido medir y cuya causa es la accion atractiva de esas masas. La misma causa afecta naturalmente en los mismos sitios

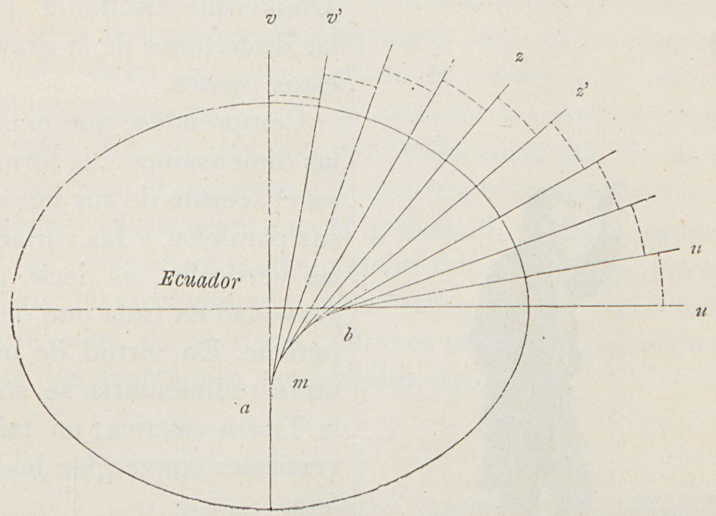


Fig. 21.—Puntos de convergencia de las verticales en la hipótesis de la forma elipsoidal de la Tierra

el nivel de los mares, de los lagos y de todas las masas líquidas tranquilas.

De todo lo cual resulta que las direcciones de la gravedad no convergen en realidad hácia el mismo punto del interior del globo.

II

VERDADERA DIRECCION DE LA CAIDA DE LOS CUERPOS

Los cuerpos pesados abandonados á sí mismos ¿caen en realidad siguiendo la vertical que marca la plomada?

Sí, cuando caen desde poca altura, y si el aire está sereno. Nadie ignora cuán raro es que las gotas de lluvia ó granizo caigan verticalmente, lo cual consiste en primer lugar, en que las nubes de donde emanan esas gotas ó granizos están las más veces impelidas por el viento, por lo cual la direccion seguida en la caida es una resultante de la direccion y de la velocidad de la nube por una parte, y de la de la gravedad ó de la vertical, por otra. Sucede tambien que áun cuando unos cuerpos tan ligeros como esos partan verticalmente, sin velocidad inicial, encuentran en su caida corrientes de aire que los desvian, y por consiguiente caen con mayor ó menor oblicuidad en la superficie del suelo.

¿Qué se requiere para que la direccion de la caida sea la de la vertical? Que no intervenga más fuerza que la de la gravedad, que el cuerpo, abandonando el estado de reposo y entregado á sí mismo sin impulso alguno, caiga en el vacío ó por lo ménos en una masa de aire perfectamente tranquila.

Se objetará tal vez que, como la Tierra está animada de un movimiento de rotacion, todos los cuerpos á ella pertenecientes, ya se hallen en el suelo ó ya en el seno de la atmósfera, están animados forzosamente de cierta velocidad, la cual es considerable en el ecuador, donde llega á 465 metros por segundo, y disminuye gradualmente hácia entrambos polos, siendo nula en ellos. ¿Cómo es que este movimiento, cuya direccion es la de la tangente al círculo de latitud, no se compensa con el que le imprime verticalmente la gravedad?

(1) Consideremos la Tierra como una elipsoide de revolucion aplanada en los polos. En este caso las normales á la elipse meridiana ó las verticales sucesivas convergen en puntos situados en una curva debajo del ecuador. Las verticales consecutivas *uu* al ecuador convergen en un punto *b* del eje mayor; en el polo las verticales *vv'* convergen en *a*, más allá del centro en el eje menor; por último, las verticales intermedias entre el ecuador y el polo, como *zz'* convergen en puntos tales como *m*; el conjunto de estos puntos de convergencia es la curva que acabamos de indicar. La superficie engendrada por dicha curva, marcará en esta hipótesis el conjunto de los puntos de encuentro de las verticales de todo el globo (fig. 21). Pero tampoco es este su lugar verdadero, porque habria que tener en cuenta las desviaciones ocasionadas por la irregularidad de forma de la esferoide y por otras causas locales.

Para responder á esta pregunta, consideremos un cuerpo A animado, ántes de abandonarle á la accion de la gravedad, de una velocidad horizontal tal, que recorre la línea AA' durante el tiempo de la caida. Si el pié de la vertical B

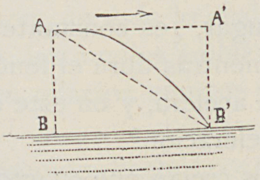


Fig. 22.—Carencia de desviacion en la caida de un cuerpo desde escasa altura

está animado de igual velocidad, es evidente que irá á parar á B' al cabo del mismo tiempo, es decir, al pié de la vertical del punto A'. En realidad, el cuerpo habrá seguido en el espacio la diagonal, ó más rigurosamente hablando, la porcion de parábola AB', pero no habrá lugar á deducir ninguna desviacion (fig. 22). Esto es lo que se observa cuando se hace el experimento desde el tope del palo de un buque en marcha; si se deja caer desde él una bala de plomo, esta caerá al pié del mástil, como si el buque estuviese parado. En el breve instante de la caida, la punta y la base del mástil habrán recorrido líneas sensiblemente iguales.

Hay sin embargo una desviacion oriental, indicada por la teoría, pero que es harto insignificante para que se la pueda apreciar cuando el cuerpo cae desde escasa altura, aparte de que las agitaciones del aire harian difícil su comprobacion. En efecto, el raciocinio precedente supone que el pié B de la vertical está animado de la misma velocidad que el punto A situado en su cima (fig. 23). Pero no es así. El

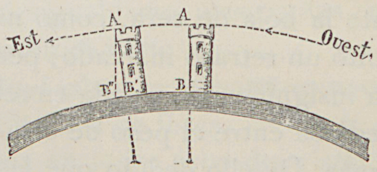


Fig. 23.—Desviacion oriental en la caida de un cuerpo

punto A describe en un segundo, por ejemplo, un arco AA' mayor que el arco BB' descrito por el pié B de la vertical, áun cuando estos arcos medidos angularmente den el mismo número de segundos, porque el radio de la circunferencia que describe el primero alrededor del eje de la Tierra (fig. 24) es A*a*, mayor que B*b*, radio del círculo descrito por el segundo. Desde entónces el cuerpo, abandonado á sí mismo, conservará miéntras dure su caida su velocidad de impulso primitiva; caerá pues en B' (fig. 23), al oriente de la vertical de su punto de partida y en una cantidad igual á la diferencia de longitud de los dos arcos en cuestion.

Esta desviacion debe ser máxima en el ecuador respecto á las caidas desde igual altura, y va disminuyendo á medida que crece la latitud, para ser enteramente nula en los polos, donde el movimiento de rotacion lo es asimismo. Hemos dicho que era muy difícil comprobar prácticamente este hecho en la atmósfera exterior á causa de las agitaciones del aire, y tambien porque las alturas de caida vertical son demasiado pequeñas. No sucede lo propio en los pozos de mina. Reich pudo medir una des-

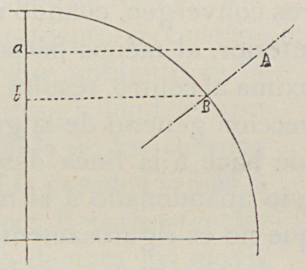


Fig. 24.—Desviacion meridional en la caida de los cuerpos

viacion de 28 milímetros en una mina de Freiberg (Sajonia) que tenia $158^{m},5$ de profundidad. En el ecuador, la desviacion teórica debe ser de 33 milímetros para 100 metros de altura.

Por lo demás, esta no es la única causa de desviacion. El movimiento de rotacion de la Tierra indica otro en direccion sur, el cual procede de la diferencia entre la fuerza centrífuga del extremo superior y del inferior de la vertical. Siendo el radio A*a* mayor que el radio B*b* (fig. 24), el cuerpo A tiene en su punto de partida una tendencia á escaparse hácia el lado opuesto, no de la direccion de la gravedad, sino de la del radio A*a*; esta fuerza supera á la fuerza centrífuga del punto B; por consiguiente, conservando el cuerpo al llegar al suelo este exceso de velocidad, caerá al sur del pié de la vertical, ó hablando con más exactitud, habiendo sufrido dos desviaciones, una oriental

y otra meridional, caerá en realidad al sudeste de dicho pié.

A Newton le corresponde el honor de haber sugerido el primero de estos experimentos; de este modo quiso comprobar directamente el movimiento de rotacion de la Tierra. Al realizarlo Hooke siguiendo su dictámen, hizo observar que la desviacion debia efectuarse al sudeste; pero Biot pone en duda que haya querido referirse á una desviacion completa contada á partir del pié de la vertical, «porque en este caso, dice, segun las fórmulas de Laplace, la desviacion al sur es de segundo órden relativamente á la absoluta; y en las observaciones de Hooke, debia ser de difícil comprobacion una separacion tan débil, por cuanto hizo sus experimentos al aire libre.»

En resúmen, si, como lo prueban las medidas de las dimensiones y de la forma del globo terráqueo, es cierto que las verticales de diferentes lugares convergen, cuando no á un mismo punto interior, al ménos hácia una region limitada próxima al centro, resulta que tal es en efecto la direccion general de la gravedad. Pero, por lo que hace á la línea descrita por un cuerpo pesado abandonado á sí mismo, debemos decir que no es rigurosamente la vertical, pues ocurren desviaciones procedentes, así de causas accidentales, entre otras la resistencia del aire, como de causas permanentes, por ejemplo, la velocidad de rotacion terrestre y la fuerza centrífuga. Más adelante veremos cuál es la forma verdadera de la trayectoria, cuando se tienen en cuenta estas dos últimas causas de desviacion.

III

CAIDA DE LOS CUERPOS. — LEY DE LA IGUALDAD DE VELOCIDAD DE LOS CUERPOS QUE CAEN DESDE UNA MISMA ALTURA.

Los antiguos, y áun los modernos hasta la época de Galileo, tenian ideas muy confusas acerca de las leyes de la velocidad de los cuerpos graves en su descenso. La falta de observaciones precisas y de experimentos bien hechos, es decir, efectuados en condiciones capaces de eliminar todas las causas perturbadoras, explica suficientemente la incertidumbre de los conocimientos que á la sazon se tenian respecto de este punto.

Hay que distinguir dos cuestiones diferentes en lo que tiene relacion con la velocidad de los cuerpos que caen. Primeramente, ¿caen todos los cuerpos, cualesquiera que sean sus volúmenes y masas, con velocidad igual ó comun al abandonarlos á sí mismos desde igual altura? En segundo lugar, ¿es constante la velocidad de descenso miéntras dura el fenómeno? ó por el contrario se acelera, y en este caso, ¿cuál es la ley de la aceleracion?

Los antiguos creian que cuanto más pesado es un cuerpo, mayor es la velocidad de su caida en igualdad de circunstancias. Tal era la opinion generalmente adoptada respecto de la primera cuestion. Por otra parte, habian comprobado la aceleracion de la velocidad de descenso, pero sin llegar á medirla ni á descubrir su ley. Acerca de este punto hemos recordado las ideas de Aristóteles y de Lucrecio, opiniones que no podian adquirir la precision ó rectificacion necesarias sino mediante los procedimientos rigorosos del método experimental.

Galileo fué el primero que hizo experimentos propios para demostrar que, si se observa una diferencia en los tiempos de descenso de los cuerpos que caen desde igual altura, esta diferencia dimana únicamente de la resistencia del aire.

En una palabra, formuló la siguiente ley:

Todos los cuerpos caen en el vacío con igual velocidad desde la misma altura.

El sabio florentino dejó caer desde lo alto de la torre inclinada de Pisa (fig. 5) varios cuerpos de diferente peso, como bolitas de oro, de plomo, de cobre, de mármol y de cera, pero del mismo volúmen, y reconoció que todos ellos llegaban sensiblemente al suelo en el mismo instante; únicamente la bola de cera, como más ligera, experimentó un retraso marcado; pero la diferencia era insignificante, y nada en relacion con la que mediaba entre el peso de esta bola y el de las demás. De ello dedujo que las ideas de Aristóteles eran falsas (1). La velocidad de los cuerpos que caen bajo la accion de la gravedad no es proporcional á sus masas ó á sus pesos. Galileo consideró las desigualdades (que cual-

(1) Y se atrevió á decirlo públicamente. Semejante audacia concitó en contra suya á los doctores de la Universidad de Pisa, cuya hostilidad fué tal, que Galileo tuvo que ausentarse de la ciudad. Tal era la libertad de la ciencia trescientos años atrás.

quiera puede observar) como originadas únicamente por la resistencia del aire, la cual depende sin duda alguna de la forma y del volúmen del cuerpo siempre y cuando se trate de masas iguales. Los experimentos comparativos que efectuó en el aire y en el agua le confirmaron en esta opinion, de todo lo cual dedujo que la resistencia de los medios ambientes estaba notoriamente en relacion con sus densidades respectivas.

Los experimentos hechos por Galileo en Pisa, los repitió Mariotte más adelante en Francia y luégo en Inglaterra, en presencia de testigos ilustres, como Newton, Halley y Derham, habiéndolos reproducido tambien Desaguliers, físico francés á quien la revocacion del edicto de Nantes habia obligado á expatriarse. Los cuerpos que este sabio dejó caer de lo alto de la cúpula de San Pablo de Lóndres eran esferas de masas y volúmenes diferentes, desde esferillas de plomo de dos pulgadas de diámetro, hasta vejigas secas y henchidas de aire, de cinco pulgadas. La resistencia del aire á la caida de los cuerpos fué tanto mayor cuanto más volúmen y ménos masa tenian, pues al paso que la esfera de plomo invirtió cuatro segundos y medio en recorrer la altura total de 272 piés, las vejigas llenas de aire necesitaron 18 segundos y medio.

Más adelante hablaremos de los experimentos que Newton hizo con objeto de demostrar con el péndulo la misma ley. Él ideó el experimento directo y decisivo que pone totalmente en evidencia la igualdad de accion de la gravedad sobre toda clase de cuerpos, cualesquiera que sean su densidad ó peso, volúmen ó forma, experimento que consiste en eliminar la causa de las desigualdades observadas, es decir, en observar en el vacío.

Hé aquí cómo se ejecuta este experimento en las cátedras de física.

Cógese un largo tubo de cristal provisto en sus extremos de dos monturas de cobre, una de las cuales lo cierra herméticamente, y la otra termina en una llave, merced á la cual se puede ajustar el tubo al platillo de una máquina llamada *máquina neumática*, propia para extraer de un receptáculo cualquiera el aire que contiene. Empiézase por introducir en el tubo cuerpos de diferentes densidades, como astillas de madera, pedacitos de metal, de pluma, papel, corcho, etc., manteniéndolos en uno de los extremos del instrumento. Si se vuelve bruscamente el tubo para darle una posicion vertical, todos los cuerpecillos introducidos parten á la vez desde dicho extremo y caen por el interior en direccion del eje del cilindro (fig. 25). Pero si se vuelve el tubo ántes de extraer el aire, se observa la desigualdad de velocidad que todos conocemos. Si se repite la prueba muchas veces, sacando progresivamente aire del tubo, se nota que esta desigualdad decrece con el enrarecimiento del medio en que se efectúa la caida. Cuando el vacío llega á ser todo lo completo posible, todos los cuerpos de distintas densidades caen á la vez en el extremo inferior del aparato.

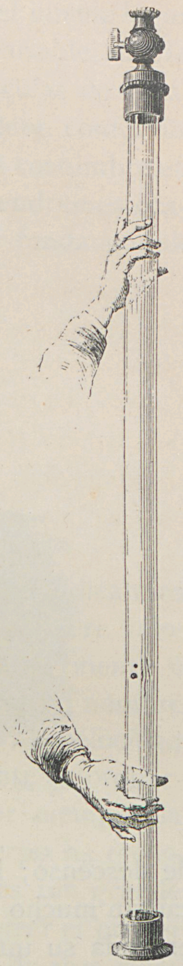


Fig. 25. — Demostracion de la desigualdad de velocidad de los cuerpos que caen en el vacío.

Por consiguiente, la resistencia del medio ambiente es la causa de la desigualdad de rapidez en la caida de los cuerpos más ó ménos pesados y más ó ménos densos. Esta resistencia, no tan sólo demora los movimientos, sino que tambien produce desviaciones en la direccion de la caida de los cuerpos ligeros. Una hoja de papel abandonada en el aire recorre una línea sinuosa, á menudo muy accidentada, ántes de llegar al suelo. Tómese un disco de papel y una moneda de diámetro algo mayor; si se les deja caer separadamente desde la misma altura, la moneda llegará al suelo ántes que el papel. Poniendo en seguida el disco de papel sobre la moneda, de modo que esta sobresalga alrededor de aquel, y dejando caer ambos objetos bien horizontalmente, no se separarán ya en su descenso, y los dos llegarán al suelo en el mismo instante, porque en este caso, la resistencia del aire, vencida por la pieza metálica, no puede hacerse sentir en la cara inferior del disco de papel.

Si dos cuerpos tienen masas desiguales, pero la misma superficie en un sentido normal á la

gravedad, la resistencia que deban vencer será la misma, mas como ésta se habrá de repartir entre mayor número de moléculas en el cuerpo más pesado, no podrá disminuir la velocidad comun tanto como en el cuerpo más ligero, y por consiguiente este invertirá más tiempo que el otro en caer desde la misma altura.

Por el contrario, tratándose de masas iguales, cuanto mayor sea la superficie presentada á la resistencia del aire, más se retrasará el movimiento

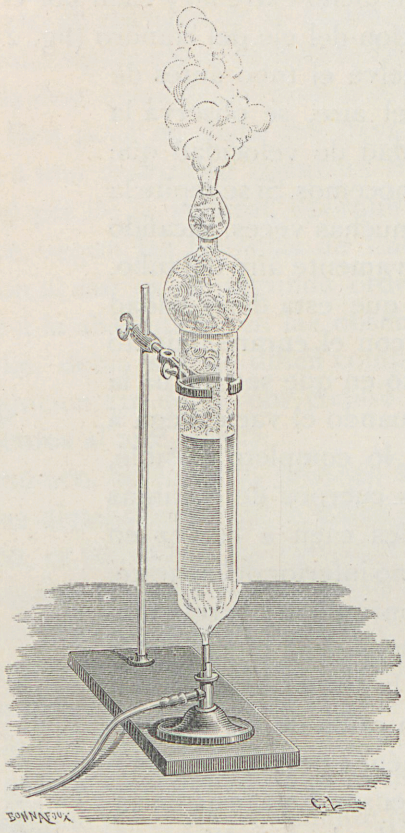


Fig. 26.— Experimento del martillo de agua. Preparacion

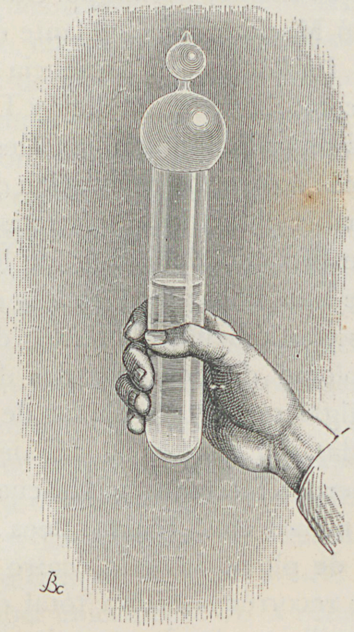


Fig. 27.— Experimento del martillo de agua. Realizacion

de descenso; las hojas de cualquier sustancia caerán mucho más despacio si se las abandona en toda su integridad que si se las comprime préviamente, dándoles, por ejemplo, la forma de una bola. La division en pequeños fragmentos produce un efecto análogo. Por este motivo se nota una gran diferencia entre la rapidez de la caida de una masa de agua congelada, solidificada y que caiga en una pieza, y la de la misma masa en estado líquido. En este último caso, la resistencia del aire, unida á la movilidad de las moléculas líquidas, da orígen á la formacion de una infinidad de gotitas finísimas y como pulverulentas. Si la altura de la caida es grande y la masa de agua no muy considerable, puede suceder que ésta no llegue al suelo sino á modo de niebla tenue. En los surtidores, cascadas, ó capas de agua naturales que caen desde gran altura se observa esta clase de fenómenos. Pero en el vacío, como la resistencia es nula, las masas líquidas caen de golpe. Para demostrarlo así, se hace uso de un tubo cilíndrico de vidrio aguzado por uno de sus extremos; se echa en él agua y se la somete á la ebullicion (figs. 26 y 27). Al escaparse el vapor, arrastra consigo el aire fuera del tubo. Entónces se cierra este á la lámpara, y se deja enfriar el líquido; tan luégo como el vapor se ha condensado, queda encima del agua un espacio vacío de aire. Si en este momento se vuelve bruscamente el aparato de arriba abajo, la masa de agua cae sin dividirse, y da contra el fondo del tubo como si fuese una masa sólida: á causa del golpe seco que produce el choque, se ha dado á este curioso experimento el nombre de prueba del *martillo de agua.* Tenemos, pues, averiguado un primer punto: que la resistencia del aire es la causa de la desigualdad que se observa en la duracion del descenso de los cuerpos que caen desde la misma altura.

Los cuerpos que caen en el vacío recorren en el mismo tiempo espacios iguales, á partir del orígen de la caida. La clase de la sustancia de que estén formados los cuerpos, la diversidad de las masas, ó de los pesos, las de las densidades y volúmenes, no tienen influencia en esta duracion.

Dedúcese de aquí la consecuencia de que la gravedad es una fuerza que se hace sentir con igual intensidad sobre las partículas más pequeñas de los cuerpos, y que obra sobre las moléculas como si cada una de ellas estuviese aislada ó independiente de las demás. Si se considera un cuerpo de corta extension, es permitido mirar las acciones de la gravedad sobre cada una de las moléculas de que aquel está formado como fuerzas paralelas é iguales. La resultante ó la suma de estas fuerzas, de estas acciones elementales de la gravedad, es lo que constituye el *peso* del cuerpo, el cual varía necesariamente, ora con el volúmen ó bien con la naturaleza de la sustancia, al paso que la gravedad, en el mismo lugar ó cuerpo, tiene una intensidad invariable, siendo tambien la misma para las partículas de igual masa. Por consiguiente, no se debe confundir el peso con la gravedad, segun es costumbre en el lenguaje usual. Mas adelante tendremos ocasion de insistir en esta distincion fundamental.

CAPÍTULO IV

CAIDA DE LOS GRAVES

I

LEYES DE LAS VELOCIDADES Y DE LOS ESPACIOS

La simple observacion ha debido bastar para que se reconociera en todo tiempo el movimiento acelerado ó de progresion de los cuerpos abandonados á sí mismos. Mediando una altura de caida algo grande y cuerpos un poco pesados, basta la simple vista para advertir el aumento de rapidez, que se echa de ver asimismo en la violencia del choque, la cual es tanto mayor cuanto más considerable la altura de la que se precipitan dichos cuerpos. En efecto, la intensidad del choque de dos cuerpos de igual masa seria la misma para cualquier altura de caida si la velocidad fuese constante.

Aristóteles hace ya mencion formal de esta aceleracion: «Así, dice, como el cuerpo al que su velocidad hace bajar más que á otro, adquiere velocidad por su propio peso;» y en otra parte: «La tierra (elemento) está animada de un movimiento, tanto más rápido, cuanto más se aproxima al centro...» (*De Cœlo*, I, VIII, 13.)

Pero, ¿en virtud de qué ley crece la velocidad? Esto es lo que ignoraban los antiguos, lo que no podian conocer por no haber hecho experimento alguno, ni tomado ninguna medida exacta. Aristóteles da á entender que la velocidad depende de las masas, como lo indican las palabras anteriormente citadas; «adquiere velocidad por su propio peso.» Anteriormente á Galileo, se enseñaba en las escuelas en nombre de las doctrinas peripatéticas, que «la velocidad de los cuerpos que caen libremente es proporcional al espacio recorrido.» Por ejemplo, la rapidez de la caida cuando el cuerpo ha recorrido 20 piés, deberia ser 20 veces tan grande como la adquirida despues de recorrer el primer pié, doble de la que tenia despues de recorridos 10 piés, etc. Esto no pasaba de ser una mera hipótesis, por nada comprobada. En el tiempo de Galileo, que la combatia, llamábase comunmente á esta supuesta ley, *ley de Baliani*, del nombre de su defensor más autorizado. (V. Hoefer, *Historia de la Física.*)

Tambien fué Galileo quien descubrió la verdadera ley, siendo interesante saber cómo lo logró. Ya hemos indicado qué experimentos hizo para cerciorarse desde luégo de que las desigualdades en la caida de los cuerpos dependen de la resistencia del aire, y no de las diferencias de peso y densidad. Otros experimentos le probaron que la rapidez crece con la altura, y por consiguiente que el movimiento de los graves era un movimiento acelerado. Entónces prescindió por un momento de la observacion

para recurrir á la hipótesis. «Supuso que, sea cualquiera la causa originaria de la *gravedad*, obra de igual modo en cada instante indivisible, comunicando á los cuerpos que hace caer al suelo un movimiento uniformemente acelerado en tiempos iguales, de suerte que las velocidades que adquieren al caer son proporcionales á los tiempos. De esta sola suposicion tan sencilla dedujo aquel filósofo toda su teoría de la caida de los cuerpos.» (*Enciclopedia metódica*, art. GRAVEDAD.)

Pero no bastaba haber emitido una hipótesis: era menester cerciorarse de que la realidad está conforme con ella, que los hechos la confirman. En esto, Galileo dió un memorable ejemplo del empleo del método, de ese método fecundo de observacion y de induccion experimental del que ha brotado la física moderna y con ella todas las ciencias naturales.

Al suponerse que la velocidad de la caida de los cuerpos crece en proporcion de los tiempos, la consecuencia inmediata es que los espacios recorridos por los cuerpos á partir del orígen del movimiento son proporcionales á los cuadrados de los tiempos invertidos en recorrerlos. Tales son las dos leyes de las velocidades y de los espacios que se trataba de comprobar, bastando la demostracion de una de ellas para deducir la de la otra.

El experimento directo apénas era posible, ni en cuanto á las velocidades ni en cuanto á los espacios, y por otra parte, la rapidez de la caida y las perturbaciones ocasionadas por la resistencia del aire son tales, que, segun hemos dicho ántes, las medidas exactas no serian la expresion de la ley.

Era pues forzoso arbitrar el medio de moderar el movimiento de modo que la observacion fuese fácil y la resistencia del aire aminorada, sin que la ley sufriese alteracion alguna. Galileo lo consiguió ideando el famoso experimento que todavía lleva su nombre, el del *Plano inclinado*. Abandonando un cuerpo pesado á la sola accion de la gravedad, por ejemplo una bola, en la parte superior de un plano que formaba con el horizontal un ángulo menor que el recto, vió que el movimiento de dicha bola debia estar sometido á las mismas leyes que el del propio cuerpo si cayera verticalmente, con la sola diferencia de que la gravedad resultaria disminuida en una relacion constante, la de las líneas AC y AB (fig. 28) que representan la altura y la longitud del plano inclinado (1).

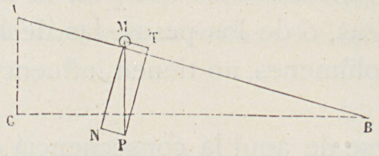


Fig. 28.—Plano inclinado. Movimiento de los graves

Habiendo moderado Galileo tanto como queria el movimiento acelerado de la gravedad valiéndose al efecto de este artificio, pudo ya medir los espacios recorridos durante los segundos sucesivos que componen la duracion de la caida. Para realizar el experimento, sirvióse de una bola de metal bruñido que rodaba por una ranura abierta en la cara superior de una viga; y levantando esta por un extremo, marcaba el tiempo que invertia la bola en recorrer toda la longitud del plano inclinado ó sus diferentes partes. Hacia tambien el mismo experimento, tesando con un peso una cuerda bien resbaladiza, inclinada con relacion al horizonte, y abandonando á sí mismo desde el punto más elevado de la cuerda, un carrito formado por dos poleas sostenidas á su vez por una masa pesada pendiente de su sistema.

De este modo reconoció Galileo que los espacios recorridos son proporcionales á los cuadrados de los tiempos invertidos en recorrerlos.

En el siglo XVII y siguientes se ha repetido de diferentes modos la comprobacion experimental de esta ley. Riccioli y Grimaldi se limitaron á dejar caer cuerpos pesados desde lo alto de torres de desigual elevacion, y medir los tiempos de caida por las oscilaciones del péndulo. La comparacion de las duraciones de la caida con los espacios recorridos les dió aproximadamente la ley del cuadrado de los tiempos. *La Enciclopedia* cita «una máquina del P. Sebastian compuesta de cuatro parábolas iguales que se cortaban en sus vértices, y por medio de esta máquina hacia patente á los ojos del cuerpo, de cuyo testimonio necesitan casi siempre los ojos del espíritu, que la caida de

(1) La fuerza MP, ó sea la gravedad dirigida en sentido vertical, puede descomponerse en dos fuerzas, una de ellas, MN, perpendicular al plano y aniquilada por la resistencia de este, y la otra MT paralela al mismo plano. Esta fuerza es la única causa del movimiento, siendo visible que su relacion con la gravedad es la de AC á AB.

los cuerpos hácia el suelo se efectúa segun la progresion descubierta por Galileo.»

Por último, á fines del siglo pasado, un físico inglés llamado G. Atwood ideó un medio ingenioso de moderar el movimiento acelerado de la caida de los cuerpos y de comprobar las dos leyes de las velocidades y de los espacios (1).

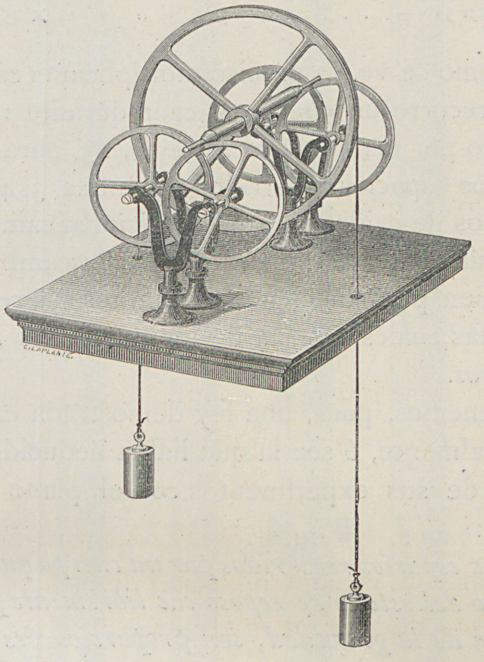


Fig. 29.—Polea de la máquina de Atwood

El artificio ideado por Atwood para retardar el movimiento de los cuerpos que caen es el siguiente: Alrededor de la garganta de una polea muy movible (fig. 29) se enrolla una hebra de seda bastante delgada, la cual sostiene en sus dos extremos dos cilindros metálicos que pesan exactamente lo mismo. En tal estado, la polea, la hebra y las pesas permanecen inmóviles, porque los dos cilindros iguales se equilibran constantemente. Si se añade entónces á uno de estos un peso adicional, el sistema se pondrá en movimiento, y las dos porciones de la hebra de seda se moverán en sentido inverso, conservando cada una su direccion vertical. Pero se comprende que la velocidad de la caida se retardará tanto más, cuanto menor sea la fraccion de la suma de los dos pesos iguales que represente el peso adicional. Supongamos que cada uno de ellos pesa 124'5 gramos, y el peso adicional 1 gramo solamente. Puesto en movimiento el peso total de 250 gramos por una fuerza que tan sólo es su 250ª parte, hace que la velocidad sufra un retraso igual al que experimentaria si la intensidad de la gravedad fuese 250 veces menor. De esta suerte se hace fácil la observacion, sin que se alteren las leyes del movimiento.

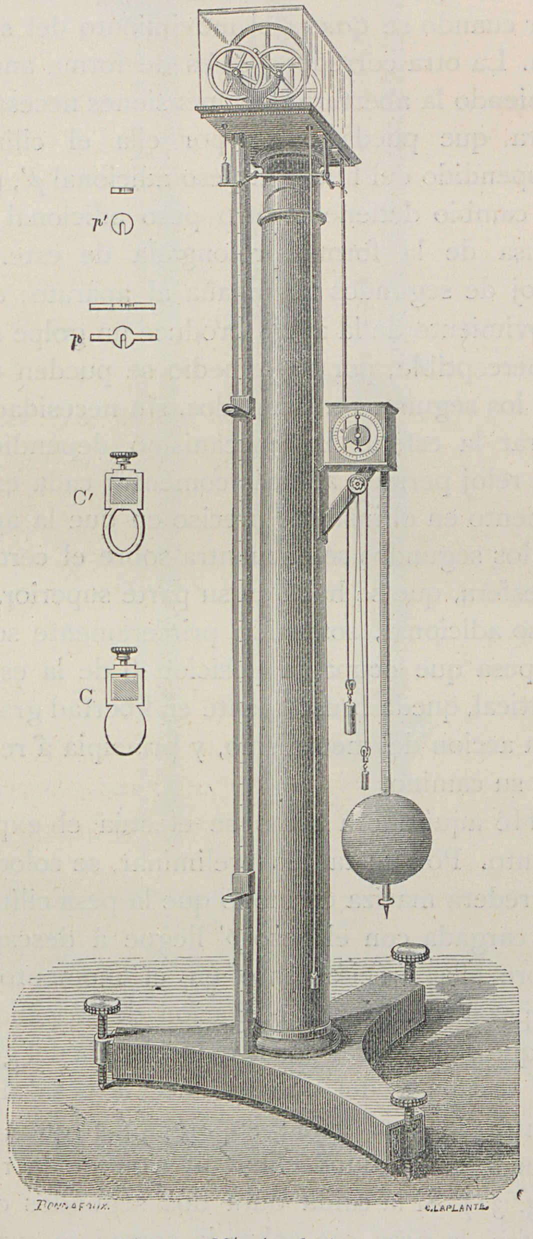


Fig. 30.—Máquina de Atwood

La figura 30 representa el conjunto y disposicion de la máquina. En la parte superior de una columna se ve la polea movible, cuyo eje descansa entre las circunferencias de dos sistemas de ruedas paralelas; luégo el hilo que se

(1) Este medio está basado en un principio de mecánica, cuyo enunciado es el siguiente: Cuando una misma fuerza (daria lo mismo considerar dos fuerzas iguales) actúa sobre dos masas diferentes durante un espacio de tiempo igual, las velocidades están en razon inversa de los tamaños de las masas. Así pues, si para determinar la caida vertical de un sistema de masa dada, se emplea únicamente como fuerza motriz la parte de la gravedad que se ejerce sobre una fraccion de la masa total, la velocidad del sistema sufrirá un retraso proporcional á la relacion que existe entre esta fraccion y la masa total. En una palabra, el movimiento se efectuará como si la intensidad de la gravedad quedara tambien disminuida en esta proporcion.

enrolla en su garganta y cuyas dos porciones mantienen tirantes los pesos iguales. Detrás de uno de los pesos se halla una regla vertical dividida con esmero, la cual permite que se lea, en todas posiciones, la distancia de su base al cero de la escala, es decir, al punto de partida del movimiento.

La regla lleva dos correderas movibles, que por medio de unos tornillos de presion pueden asegurarse enfrente de cualquiera de las divisiones. La corredera inferior C es maciza, y por consiguiente merced á ella se puede detener cuando se quiera el movimiento del sistema. La otra corredera C' es de forma anular, teniendo la abertura las dimensiones necesarias para que pueda pasar por ella el cilindro suspendido del hilo y el peso adicional *p'*, pero en cambio detiene el otro peso adicional *p* á causa de la forma prolongada de este. Un reloj de segundos acompaña al aparato; cada movimiento de la aguja produce un golpe seco y perceptible, por cuyo medio se pueden contar los segundos trascurridos, sin necesidad de mirar la esfera. Un mecanismo dependiente del reloj permite además comenzar cada experimento en el instante preciso en que la aguja de los segundos se encuentra sobre el cero de la esfera, que se halla en su parte superior. El peso adicional, sostenido primeramente sobre la pesa que ocupa la posicion 0 de la escala vertical, queda bruscamente en libertad gracias á la accion del mecanismo, y principia á recorrer su camino.

Hé aquí ahora cómo se efectúa el experimento. Por un tanteo preliminar, se coloca la corredera maciza de modo que la pesa cilíndrica cargada con el peso *p'* llegue á descansar sobre ella precisamente en el momento de empezar la segunda oscilacion de la péndola; lo que se advierte por la coincidencia del golpe del escape y del que produce la pesa al dar contra la corredera; supongamos que esto ocurra en la duodécima division de la regla (fig. 31). Si la caida dura dos segundos completos, la pesa cae sobre la corredera cuando esta está colocada en la division 48. Entónces se reconoce, comenzando sucesivamente la operacion durante tres, cuatro, cinco segundos, etc., que la corredera maciza debe estar colocada en las divisiones siguientes: 108, 192, 300, etc., para que el choque de la pesa coincida en cada caso con el golpe de los segundos del reloj.

De esta suerte los espacios recorridos son:

En 1 segundo.	12 centímetros;		
En 2 —	48	ó	12 × 4
En 3 —	108	ó	12 × 9
En 4 —	192	ó	12 × 16
En 5 —	300	ó	12 × 25, etc.

Como se ve, es preciso multiplicar el espacio que recorre un cuerpo al caer durante un segundo por los números 4, 9, 16, 25, para obtener los espacios recorridos durante 2, 3, 4, 5 segundos de caida. Si el peso adicional cambiase, los números que miden los espacios cambiarian tambien, permaneciendo constantes sus relaciones, las cuales son las de los *cuadrados de los tiempos.*

Tenemos, pues, una ley demostrada experimentalmente, ó sea la que habia deducido Galileo de sus experimentos con el plano inclinado:

Los espacios recorridos por un cuerpo que partiendo del estado de reposo cae libremente por la accion de la gravedad, son proporcionales á los cuadrados de los tiempos trascurridos desde el orígen de la caida.

Réstanos deducir la ley de las velocidades, esto es, saber cuál será la velocidad adquirida en 1, 2, 3 ó más segundos que dure la caida. Miéntras el cuerpo está sometido á la accion de la gravedad, su velocidad aumenta constantemente por cada instante que dure la caida, y por consiguiente esta observacion es difícil de hacer; para que sea posible, se requiere que el influjo constante de la gravedad se anule en el momento mismo en que comienza el segundo siguiente, continuando el cuerpo su movimiento; pero entónces se mueve de un modo uniforme y en virtud tan sólo de la velocidad adquirida.

Importa penetrarse bien de lo que se entiende por velocidad de un cuerpo que cae, ó en términos generales, que participa de un movimiento acelerado. Esta velocidad, en un instante dado del movimiento, es el espacio que recorreria el cuerpo uniformemente en cada uno de los segundos sucesivos, si la accion de la fuerza dejase de producirse y por lo tanto la aceleracion del movimiento. La corredera anular *p* de la máquina de Atwood permite realizar

esta hipótesis. Basta fijarla en las divisiones indicadas por el primer experimento, y buscar luégo por tanteo en qué puntos de la regla es menester colocar sucesivamente la corredera maciza, para que la pesa libre de su peso adicional venga á chocar con ella al principio del segundo siguiente.

Suponiendo que p tenga la misma masa que p', el experimento dará los números siguientes: 36, 96, 180, etc. (fig. 32). De aquí resulta que

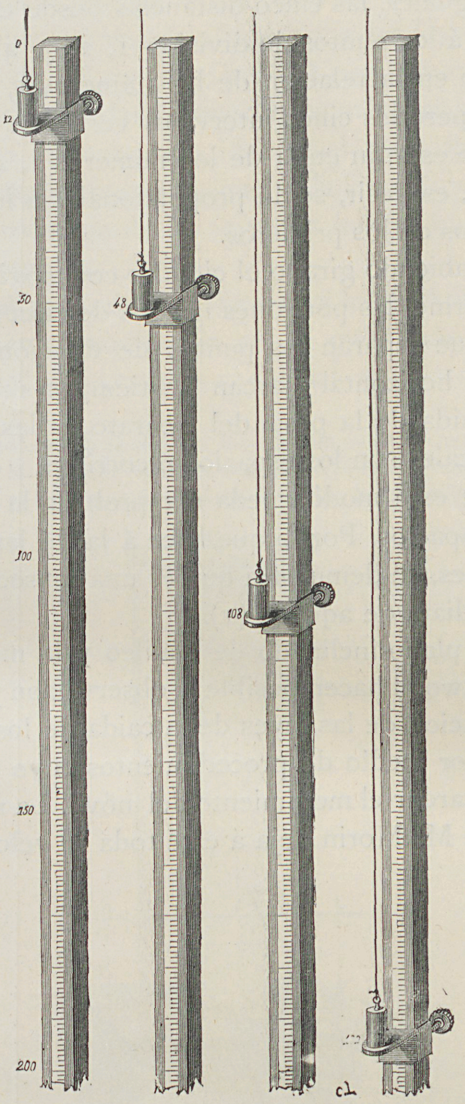


Fig. 31.—Estudio experimental de la caida de los cuerpos. Ley de los espacios recorridos

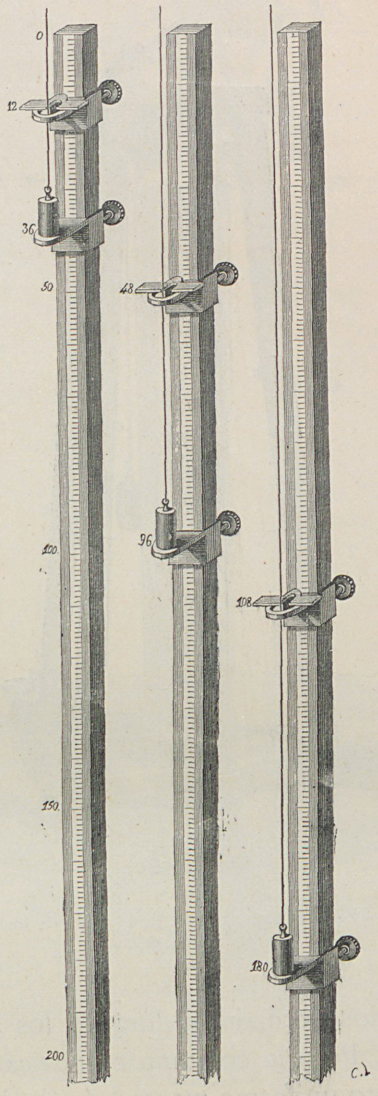


Fig. 32.—Estudio experimental de la caida de los cuerpos. Ley de las velocidades

la velocidad uniforme del cuerpo grave, adquirida en 1, 2, 3, etc., segundos de caida, es:

En 1 segundo.	de 24 centímetros;		
En 2 —	48	—	
En 3 —	72	—	etc.

Así pues, la velocidad va aumentando proporcionalmente á los tiempos y, por consiguiente, la segunda ley á que obedece la caida de los cuerpos graves se enunciará como sigue:

Cuando un cuerpo cae libremente por el influjo de la gravedad, su velocidad se acelera; esta velocidad es, en un momento cualquiera de la caida, proporcional al tiempo trascurrido desde el orígen del movimiento.

Resulta tambien de los mismos experimentos que la velocidad adquirida tras un segundo de caida es doble del espacio recorrido durante el primer segundo, siendo fácil comprender que esta consecuencia es independiente de la unidad de tiempo que hemos escogido.

Compruébanse asimismo estas leyes experimentalmente con la máquina llamada de *indicaciones continuas*, cuya primera idea se debe á M. Poncelet y que ha sido realizada por M. Morin. La figura 33 representa dicha máquina en conjunto. Una pesa de forma cilindro-cónica desciende libremente guiada en su caida por dos varillas de hierro verticales, y provista de

un lápiz que traza una línea continua en un cilindro de madera forrado de papel.

Si este cilindro ó columna estuviese fijo, la línea trazada por la pesa en su caida seria una recta vertical que no indicaria nada acerca de

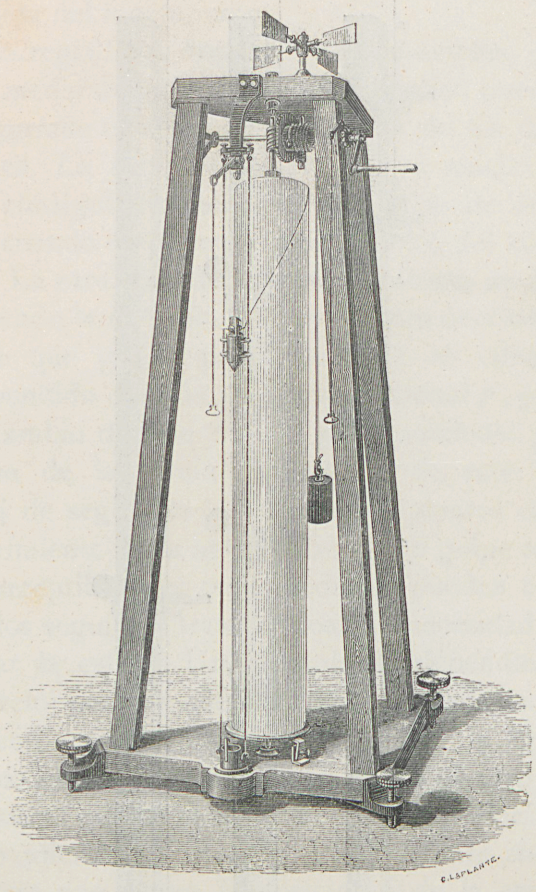


Fig. 33.—Estudio experimental de la caida de los cuerpos. Máquina de Morin

los espacios recorridos durante los segundos sucesivos. Pero la columna cilíndrica gira con movimiento uniforme merced á un sistema de ruedas dentadas movidas por el descenso de una pesa, obteniéndose la uniformidad de la rotacion por medio de un regulador de paletas que engrana con las ruedas del sistema. Gracias al movimiento del cilindro, y por consecuencia, del papel de que está forrado, el lápiz traza una curva en el papel, siendo el estudio de esta curva el que demuestra la ley de los espacios recorridos por el cuerpo en su caida.

Así es en efecto, pues desarrollando el papel se ve que la línea trazada por el lápiz es lo que se llama en geometría una mitad de *parábola* (figura 34), cuya propiedad fundamental puede enunciarse en estos términos:

Las distancias de los puntos sucesivos de la curva á una perpendicular al eje, trazada por su vértice, son proporcionales á los cuadrados de las distancias de estos mismos puntos al eje mismo.

Dividiendo la perpendicular al eje en 5 partes iguales, las cinco distancias desde el vértice o á los puntos de division 1, 2, 3, 4, 5, estarán en la relacion de los números 1, 2, 3, 4 y 5; pero los cinco intervalos verticales paralelos lo estarán en la de los números 1, 4, 9, 16 y 25, es decir, serán proporcionales á los cuadrados de los primeros.

Habiendo girado el cilindro con movimiento uniforme, las porciones iguales de circunferencia que separan los puntos de division de la línea horizontal marcan los tiempos sucesivos de caida de la pesa del aparato, y las líneas verticales son los espacios recorridos.

De este modo queda comprobada la ley de los espacios. Por lo que hace á la de las velocidades, se demuestra que es una consecuencia inmediata de aquella (1).

El plano inclinado de Galileo y la máquina de Atwood hacen posible la observacion y comprobacion de las leyes de la caida de los cuerpos por medio de procedimientos cuyo objeto es retardar el movimiento del móvil. La máquina de M. Morin deja á este toda su velocidad,

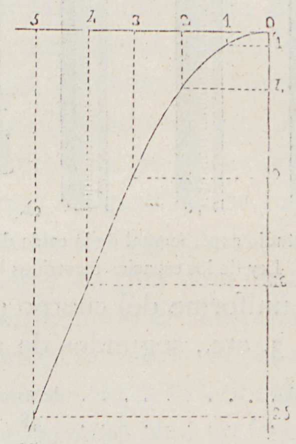


Fig. 34.—Parábola descrita por el cuerpo en su caida

pero anota gráficamente las observaciones. Otro aparato ideado por M. Bourbouze participa de

(1) En *La Chispa eléctrica* de M. Cazin se describe una máquina en la cual se marca gráficamente el movimiento del cuerpo grave como en la de M. Morin; sólo que la curva parabólica resulta trazada en ella por puntos sucesivos correspondientes á otras tantas descargas eléctricas.

Copiaremos dicha descripcion, como cosa curiosa:

«Un cilindro de metal, forrado de una hoja de papel y colocado verticalmente, recibe de un mecanismo de relojería una rotacion uni-

las ventajas de ambos procedimientos; toma de la máquina de Atwood el principio del retraso de la caida, y de la de Morin el de la anotacion de las observaciones, aunque el medio gráfico no es el mismo. Seria supérfluo describir esta invencion ingeniosa, si tan sólo se tratara de demostrar una vez más cuáles son las leyes de la caida de los cuerpos; pero sí nos parece en alto grado útil dar á conocer los métodos especiales de demostracion ideados por los físicos cuando se les puede aplicar á la investigacion y comprobacion de las leyes de los fenómenos más generales.

La máquina de Bourbouze es la de Atwood ligeramente modificada en lo que atañe á la caida del cuerpo grave, el cual es una masa adicional unida al sistema de dos pesas que se equilibran en todas las fases de la caida. Pero la polea ó rueda de garganta, alrededor de la

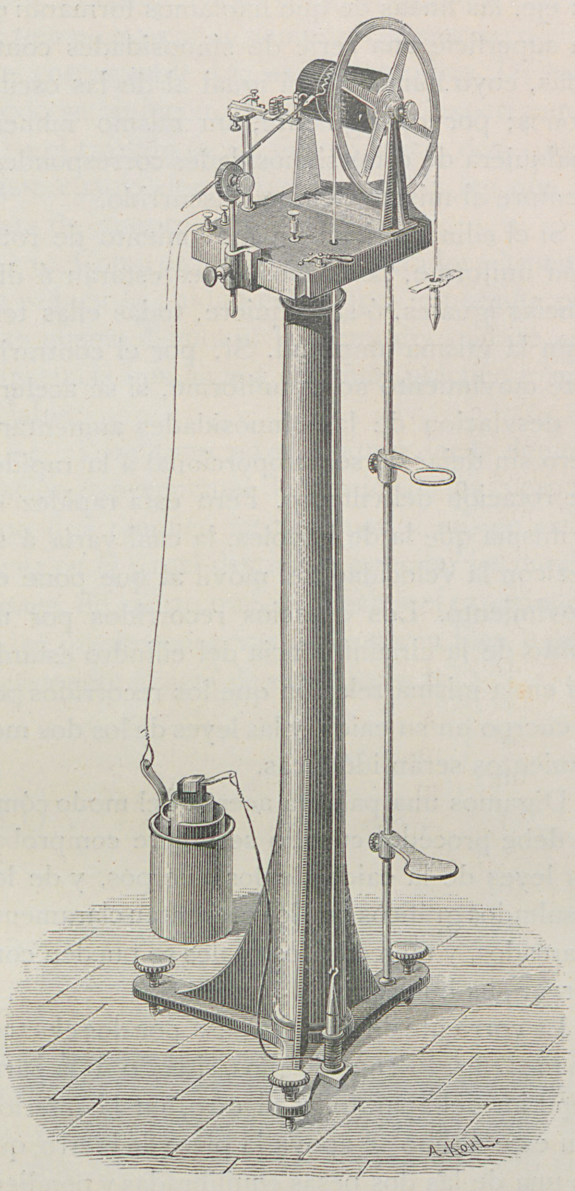


Fig. 36.—Máquina de Bourbouze para comprobar la ley de la caida de los cuerpos

cual se enrolla el hilo que sostiene las dos pesas, está montada en el mismo eje que un cilindro forrado de papel, tiznado de negro de humo (fig. 36).

Una lengüeta elástica de hierro dulce L está doblada en su extremidad inferior de modo que pueda vibrar horizontalmente cuando queda por un momento separada de su posicion de equilibrio; en este caso es sabido que estas oscilaciones, todas isócronas, pueden servir por su número para medir el tiempo. La otra extremidad de la lengüeta lleva un punzon fino y flexible que traza tambien alternativamente

---

forme alrededor de su eje (fig. 35). Este cilindro está en comunicacion con uno de los polos del carrete de induccion ó bobina de Ruhmkorff, provista de su interruptor de vibraciones rápidas. El cuerpo grave es

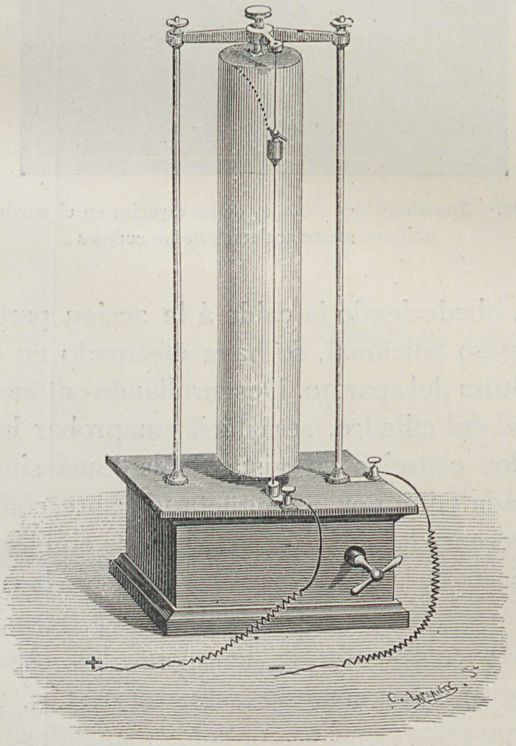


Fig. 35.—Indicador eléctrico para comprobar la ley de la caida de los cuerpos

un pequeño cilindro de plomo con su extremo inferior cónico, atravesado por un alambre de cobre aislado, fijo verticalmente á corta distancia del cilindro y provisto de un punzon de platino situado muy cerca del papel; este alambre comunica con el segundo polo de la bobina.

»Supongamos que el cuerpo grave está en reposo y el interruptor funcionando; las chispas brotarán rápidamente entre el punzon y la superficie del cilindro, produciendo una serie de agujeritos en el papel, en una circunferencia horizontal.

»Abandonemos el cuerpo grave á sí mismo; caerá deslizándose ligeramente por el hilo vertical que le sirve de guía, y la serie de agujeritos formará en toda la altura recorrida una curva parabólica que resuelve el problema.»

de derecha á izquierda y de izquierda á derecha líneas horizontales que quedan impresas en blanco en el cilindro. Si este gira alrededor de su eje, las líneas de que hablamos formarán en su superficie una serie de sinuosidades continuas, cuyo número será igual al de las oscilaciones; por consiguiente, un mismo número cualquiera de estas sinuosidades corresponderá siempre al mismo tiempo trascurrido.

Si el cilindro tiene un movimiento de rotacion uniforme, las sinuosidades estarán á distancias iguales, ó si se quiere, todas ellas tendrán la misma amplitud. Si, por el contrario, este movimiento no es uniforme, si se acelera, la desviacion de las sinuosidades aumentará, pero sin dejar de ser proporcional á la rapidez de rotacion del cilindro. Pero esta rapidez es la misma que la de la polea, la cual varía á su vez con la velocidad del móvil al que pone en movimiento. Los espacios recorridos por un punto de la circunferencia del cilindro estarán así en la misma relacion que los recorridos por el cuerpo en su caida, y las leyes de los dos movimientos serán idénticas.

Digamos una palabra acerca del modo cómo se debe proceder cuando se quiere comprobar las leyes de la caida de los cuerpos, y de los resultados gráficos que los presentan claramente marcados, y merced á los cuales se pueden conservar sus huellas.

La corriente de una pila pasa por dos electro-imanes (fig. 36); uno de ellos, situado en la parte superior del aparato, y el otro, en la inferior. En este último se apoya la pieza de hierro, que es una de las dos pesas equilibradas y pendientes del hilo enrollado en la garganta de la polea. La atraccion de este electro-iman retiene la pesa, impidiéndole obedecer al movimiento comun que la masa adicional imprimiria al sistema. El otro electro-iman mantiene la lengüeta vibrante separada de su posicion de equilibrio.

Cuando se quiere dar principio al experimento, hay que interrumpir bruscamente la corriente, y entónces, como por una parte el electro-iman inferior no retiene ya la masa, el sistema se pone en movimiento por la accion que en él ejerce la pesa adicional, y comienza la caida bajo el influjo de la gravedad disminuida. Por otra parte, la lengüeta vibrante vuelve á su posicion de equilibrio, va más allá de ella y ejecuta la serie de sus oscilaciones; el tiempo resulta medido, segun hemos dicho, por la distancia que media en el cilindro entre el orígen y el fin de cada oscilacion marcada.

Supongamos el experimento hecho de modo

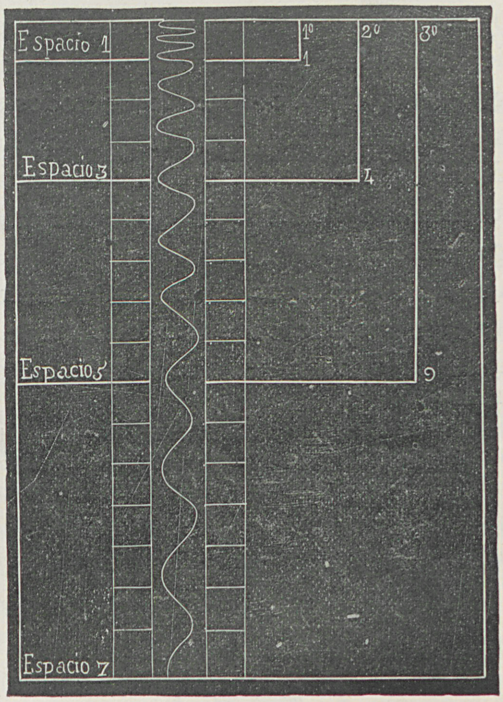


Fig. 37.—Trazado gráfico de la ley de los espacios en el movimiento uniformemente acelerado de los cuerpos

que, obedeciendo la caida á la accion perenne del peso adicional, se haya efectuado en toda la altura del aparato. Desenrollando entónces el papel del cilindro, será fácil comprobar la ley de los espacios en vista de la línea sinuosa trazada en él por la lengüeta vibrante, como lo representa la figura 37. Adviértese en ella que, respecto de las duraciones sucesivas de la caida, correspondiente cada una de ellas á tres vibraciones enteras de la lengüeta, los espacios recorridos son como los números 1, 3, 5, 7...... Luégo estos espacios, contados y sumados desde el orígen del movimiento son como los números 1, 4, 9, 16..... es decir, proporcionales á los cuadrados de los tiempos.

Si se trata de comprobar la ley de las velocidades ó de su proporcionalidad á los tiempos, entónces se hace uso del procedimiento de Atwood, interponiendo en el punto apetecido la corredera anular que recibe el peso motor adicional. Desde este momento, todas las vibraciones anotadas conservan la misma amplitud, lo cual indica que el cilindro adquiere un mo-

vimiento de rotacion uniforme. Comparando las series obtenidas de este modo despues de algunos tiempos de caida, se ve que los espacios correspondientes á un mismo número de vibraciones son proporcionales á estos tiempos. Puédese además reconocer que el espacio recorrido con uniformidad durante un tiempo igual al de la caida, es precisamente doble del recorrido por el cuerpo pesado durante su movimiento acelerado.

En una palabra, la velocidad adquirida en un momento dado es constantemente doble que el espacio recorrido desde el orígen de la caida hasta este mismo instante.

M. Buignet resume del modo siguiente las ventajas de este medio ingenioso de comprobacion de las leyes de la caida de los graves.

«El aparato de M. Bourbouze, dice en sus *Manipulaciones de física*, difiere de la máquina de Atwood y de los demás aparatos en cuatro puntos esenciales que le hacen sumamentre precioso, bajo el punto de vista práctico.

»1.° Establece una coincidencia tan perfecta como pueda desearse entre el orígen del tiempo y el orígen del espacio;

»2.° Permite variar como se quiera la unidad de tiempo marcando siempre el espacio recorrido que corresponde á la unidad escogida. De este modo se obtienen, en un mismo experimento y en el trazado de un mismo surco, dos, tres y hasta cuatro demostraciones de la ley que se trata de comprobar;

»3.° Como proporciona al operador el medio de reducir la unidad de tiempo, le permite por esto mismo disminuir la altura del aparato, circunstancia que hace á este más práctico y manejable;

»4.° Por último, no se limita á dar la demostracion experimental de la caida de los cuerpos; sino que tambien inscribe por sí mismo estas leyes en el papel destinado á recibir las impresiones, de suerte que, al concluir el experimento, se puede conservar una imágen bien y perfectamente exacta de estas leyes (1).»

CAPÍTULO V

LEYES DE LA GRAVEDAD.—EL PÉNDULO

I

ISOCRONISMO DE LAS OSCILACIONES DEL PÉNDULO

Hallándose Newton sentado cierto dia en su jardin de Woolstrop, vió que de la copa de un árbol inmediato se desprendia una manzana, la cual fué á caer á sus piés. Tan vulgar circunstancia le sugirió, segun se dice, sus profundas investigaciones sobre la naturaleza de la gravedad, haciéndole reflexionar en si esa accion misteriosa, á la que están sujetos todos los cuerpos terrestres, cualquiera que sea su altura en la atmósfera, y tanto en el fondo de los valles como en la cumbre de las más altas montañas, se extenderia tambien á los que se hallan situados en la Luna. El resultado de los esfuerzos y meditaciones de aquel potente genio fué la solucion de tan gran problema; pero áun trascurrieron veinte años ántes que quedara construido, en toda su majestuosa belleza, el edificio cuyos cimientos echaron Keplero, Galileo y Huygens, que los sucesores de Newton terminaron, y que ostenta en su frontispicio esta frase hoy triunfante: *gravitacion universal.*

Pero ¿es verídica la anécdota contada por los biógrafos del grande hombre? Poco importa (2): lo esencial es que tenga algunos visos de vero-

(1) Hé aquí cómo se procede para ello. Terminado el experimento, se quita del cilindro el papel en que están marcadas las vibraciones de la lengüeta, y se le sumerge en éter para que estas no se borren, cosa que sucederia en breve á causa del roce sobre el negro de humo: en seguida se le pega en una hoja de papel blanco, y ya se pueden trazar las medidas necesarias para las comprobaciones.

(2) Aunque ha sido controvertida, tiene en su favor el testimonio de un contemporáneo de Newton y de uno de sus amigos particulares, Pemberton. En los *Elementos de filosofía de Newton*, de Voltaire, se lee lo siguiente: «Cierto dia del año 1686, Newton, que residia en el campo, vió caer á sus piés la fruta de un árbol, y, *segun me ha contado su sobrina* (mad. Conduitt), empezó desde entónces á meditar profundamente en la causa que de tal modo atraia á todos los cuerpos...» Estos dos testimonios dan al hecho citado gran verosimilitud.

similitud. Engañaríase sin embargo el que creyese que pudo menguar en lo más mínimo la gloria del sabio. Millones de veces habia ocurrido la misma casualidad anteriormente á Newton, y pudieron presenciarla sus antecesores lo mismo que sus contemporáneos: un caso tan insignificante como la caida de una manzana no podia suscitar tales ideas sino en un hombre dotado de una imaginacion avezada á las más altas especulaciones y movida por una voluntad bastante poderosa para *pensar en ellas siempre.*

Un caso parecido sirvió de punto de partida para las investigaciones de Galileo sobre el movimiento del péndulo. Hácia el año 1582 fué cuando, el que debia dar tan gran impulso á la física experimental y que á la sazon apénas contaba diez y ocho años, preludió sus descubrimientos futuros con la observacion siguiente(1): «Un dia en que asistia, algo distraido sin duda, á una ceremonia religiosa, fijó sus miradas en una lámpara de bronce, obra maestra de Benvenuto Cellini, que, suspendida de una larga cuerda, oscilaba con lentitud ante el altar. Quizás, con los ojos fijos en aquel metrónomo improvisado, unió su voz á la de los celebrantes: la lámpara se detuvo poco á poco, y atento Galileo á sus últimos movimientos, observó que marcaba siempre el mismo compás.» (J. Bertrand, *Galileo y sus trabajos.*) Esta última circunstancia fué la que más le llamó la atencion. La lámpara, á medida que se acercaba al fin de su movimiento, describia en el espacio arcos de menor amplitud cada vez, permaneciendo empero constante la duracion de las oscilaciones. El sabio filósofo italiano repitió muchas veces el experimento, y acabó por descubrir la relacion que existe entre esta duracion y la longitud de la cuerda que soporta el peso oscilante. Más adelante (en 1673), Huygens completó tan hermoso descubrimiento y formuló la ley matemática de los movimientos del péndulo, basando su demostracion en las leyes de la caida de los graves, segun las habia anunciado Galileo.

Procuraremos hacer comprender en qué consiste esta ley, y qué relacion tiene con la teoría de la gravedad.

(1) A la sazon estudiaba medicina en Pisa, de cuya universidad llegó á ser profesor algunos años despues, habiendo emprendido entónces la serie de experimentos acerca de la gravedad que dejamos relatados hasta descubrir las leyes de la caida de los graves.

Supongamos un punto material y pesado, M', suspendido de uno de los extremos de un hilo inextensible y sin peso; esto es imposible realizarlo en la práctica, pero sí accesible á la teoría. Teniendo sujeto el hilo por su extremo superior, la accion de la gravedad obrará sobre el peso y atraerá el hilo hácia la vertical, de modo que el sistema entero permanecerá en reposo; pero si en un espacio privado de aire apartamos el hilo de su posicion vertical, sin que deje de estar en línea recta, y lo abandonamos á sí mismo, ¿qué sucederá?

En esta nueva posicion del hilo, ó sea en AM, la fuerza de gravedad continúa obrando sobre el punto material; pero como esta fuerza sigue siempre la vertical y al hilo no le sucede ya lo propio, la resistencia de este no puede anularla por completo. El punto material, atraido por ella, caerá; mas como, por otra parte, el hilo es hipotéticamente inextensible, la caida no podrá efectuarse sino á lo largo de un arco de círculo que tiene su centro en el punto A de suspension y cuyo radio es la longitud AM del mismo hilo (fig. 38): es como si el punto estuviese en

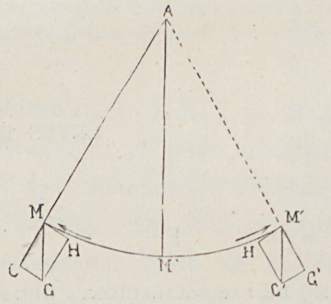


Fig. 38.—Movimiento oscilatorio de un péndulo simple

un plano inclinado que tuviera en M su cúspide y una inclinacion cada vez menor: el movimiento debe, pues, efectuarse cediendo al impulso de una fuerza continua pero no constante, puesto que irá disminuyendo hasta el punto M' en que, coincidiendo el hilo de nuevo con la vertical, llegará á ser nula la componente de la gravedad. Sin embargo, la velocidad del móvil no habrá dejado de crecer hasta hallarse en dicha posicion M'. A partir de este punto, el movimiento continuará en virtud de la velocidad adquirida; pero entónces, remontando el punto á lo largo del arco, la componente de la gravedad ejercerá su accion en sentido contrario al del movimiento, y la velocidad pasará de nuevo,

aunque en órden inverso, por valores decrecientes, hasta que el punto haya descrito un arco M' M" igual al primero. Al llegar en M' á la altura del punto M, la velocidad quedará otra vez anulada, y cesará el movimiento para volver á comenzar en seguida. Ahora ya es fácil comprender que el punto matemático habrá de empezar de nuevo, si bien en sentido inverso, un movimiento análogo y perfectamente igual al primero, toda vez que las circunstancias son las mismas. Este seria el movimiento continuo, si fuera posible realizar el experimento en las condiciones que hemos supuesto.

El instrumento ideal que acabamos de describir lleva el nombre de *péndulo*, y se le llama además *péndulo simple* por oposicion á los péndulos reales, pero *compuestos*, únicos que pueden construirse, y cuyo movimiento es dable observar. El movimiento total de M á M' se llama *oscilacion* (1), y su duracion es naturalmente el tiempo que el móvil invierte en recorrer la oscilacion entera. El ángulo MAM" de las dos posiciones extremas, ó el arco recorrido M M' M" lleva el nombre de *amplitud* de la oscilacion.

Hemos visto que la observacion dió á conocer á Galileo el isocronismo de las oscilaciones del péndulo. Este isocronismo es necesario en la hipótesis del péndulo simple, porque como la oscilacion no varía miéntras dura el movimiento, los arcos iguales son recorridos evidentemente en tiempos iguales. Pero cuando la amplitud primitiva es algo regular, como en la realidad va disminuyendo por efecto de varias influencias, la duracion de las oscilaciones es tambien variable y cesa el isocronismo.

Por fortuna, la teoría demuestra, y la práctica confirma, la persistencia de la igualdad de la duracion de las oscilaciones cuando su amplitud es sumamente pequeña. Hé aquí en qué términos se puede enunciar esta ley:

Cuando las oscilaciones del péndulo son sumamente pequeñas, su duracion es independiente de su amplitud, y no varía sino con la longitud del péndulo y con la intensidad de la gravedad.

(1) En Alemania é Inglaterra los físicos entienden por oscilacion el doble movimiento de ida y vuelta que hace que el péndulo vuelva á la misma posicion, y por lo tanto cada oscilacion es doble de como se la define en Francia. La misma diferencia se advertirá en la definicion de las vibraciones sonoras ó de las ondulaciones luminosas.

Suponiendo constantes la longitud y la intensidad, la ley precedente se podrá formular así:

Las oscilaciones pequeñísimas de un péndulo son isócronas (2).

¿Qué se entiende por oscilaciones pequeñísimas? Aquellas cuyo ángulo no pasa de tres ó cuatro grados.

II

LEY DE LAS OSCILACIONES DEL PÉNDULO.—RELACION ENTRE LA LONGITUD DEL PÉNDULO Y LA DURACION DE LAS OSCILACIONES

La segunda ley que rige los movimientos del péndulo establece una relacion entre la duracion de las oscilaciones y la longitud de aquel. Supongamos una serie de péndulos el menor de los cuales marque los segundos, efectuando los otros cada una de sus oscilaciones en 2, 3, 4..... segundos. Las longitudes de estos últimos serán 4, 9, 13..... veces mayores que la del primero. Los péndulos que marcasen ½, ⅓, ¼ de segundo serían, por el contrario, 4, 9, 16... veces más cortos que el primero. En una palabra, cuando los tiempos siguen la serie de los números simples, las longitudes siguen la serie de los cuadrados de estos números. Exprésase esto en términos generales diciendo:

Las longitudes de los péndulos se hallan en razon inversa de los cuadrados de las duraciones de sus pequeñas oscilaciones (3).

La teoría y la observacion concuerdan para demostrar esta importante ley. Finalmente, para terminar el enunciado completo de la ley ó leyes de los movimientos del péndulo,

(2) A primera vista parece singular esta igualdad de duracion respecto de oscilaciones cuya amplitud disminuye cada vez más, es decir, respecto de caminos desiguales recorridos bajo la influencia de una fuerza invariable. Como no podemos dar aquí la demostracion matemática de la ley, procuraremos explicar, aproximadamente al ménos, la razon de la igualdad en cuestion. Si se reflexiona un poco, se comprenderá que en el momento en que la amplitud fuese doble, por ejemplo, las fracciones del arco total recorrido tendrán doble longitud que las del arco que corresponderia á una amplitud la mitad menor. Pero las componentes de la gravedad y las velocidades adquiridas son dobles tambien. El péndulo las describe pues sucesivamente en tiempos iguales. Desde entónces la suma de estas duraciones elementales, iguales en número en ambos casos, continúa siendo la misma. Aplícase el raciocinio á cualesquiera amplitudes desiguales, si bien con la condicion de que sean muy pequeñas, porque únicamente en esta hipótesis se permite confundir el arco con el seno, y porque hay proporcionalidad entre las velocidades adquiridas ó las componentes de la gravedad y los arcos que el péndulo ha de recorrer.

(3) O lo que es lo mismo, las duraciones de las oscilaciones de los péndulos son entre sí como las raíces cuadradas de sus longitudes.

añadiremos que las duraciones de oscilaciones sumamente pequeñas varían cuando varía tambien la intensidad de la gravedad (y pronto veremos cómo ocurren tales variaciones). *Estas duraciones están en razon inversa de las raíces cuadradas de la intensidad de la gravedad.* Y puesto que acabamos de hablar de las comprobaciones prácticas, y sabemos ya que es imposible realizar un *péndulo simple*, será tiempo de decir cómo se aplican las leyes de este péndulo ideal á los péndulos reales ó *compuestos*.

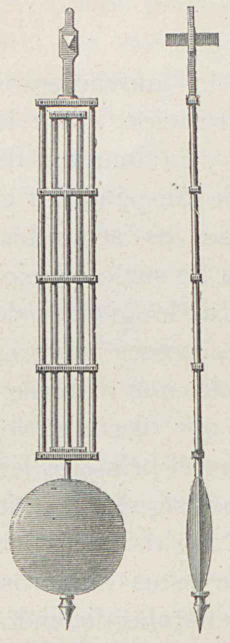


Fig. 39.—Péndulo compuesto

Los péndulos de esta última clase consisten por lo comun en una masa lenticular ó bola esférica de metal, y en una varilla que encaja en el centro de figura de la masa metálica. La varilla va unida por su extremo superior á una cuchilla triangular que descansa por su filo horizontal, ligeramente redondeado, en un plano duro y bruñido, de ágata ó de acero por ejemplo. Lo más frecuente es que la varilla termine en una delgada lámina metálica flexible y elástica encajada en una especie de tenaza fija (fig. 39). Tales son los péndulos que se usan para regular la marcha de las máquinas de los relojes.

En un péndulo de esta clase, lo que se entiende por su longitud no es la distancia que hay del punto ó eje de suspension á la extremidad inferior de la bola pesada, sino poco más ó ménos la distancia que media entre dicho punto y el centro de figura de la bola, en el caso de que esta sea una esfera de metal muy denso, de platino, por ejemplo, y la varilla de suspension delgada. El centro de suspension toma en este caso el nombre de *centro de oscilacion*. En lugar de un punto, es una línea paralela al eje de suspension, á la que se da el nombre de *eje de oscilacion* si el péndulo oscila, como de costumbre, alrededor del filo de una cuchilla. Hé aquí las razones de la distincion fundamental relativa á la definicion de la *longitud del péndulo*:

En el péndulo simple sólo hay un punto material, mas en el compuesto hay infinitos, ya en la varilla ó ya en la bola metálica: es como si se tuviera una serie de péndulos simples de distintas longitudes, todos los cuales oscilaran de consuno. Si estos péndulos estuviesen libres, las duraciones de las oscilaciones variarian de unas á otras, en virtud de la ley que enlaza las longitudes á dichas duraciones; pero como se encuentran unidos, el movimiento de cada molécula resulta acelerado para las más próximas al punto ó eje de suspension. Por consiguiente entre unas y otras hay algunas cuyas duraciones de oscilacion son precisamente las de un péndulo simple de igual longitud. El cálculo enseña á averiguar la posicion de estas moléculas, es decir, el punto ó la línea que acabamos de llamar centro ó eje de oscilacion.

Huygens demostró una curiosa propiedad del péndulo compuesto, cuya aplicacion veremos muy en breve y que puede servir para hallar prácticamente el eje de oscilacion. Si, despues de hacer oscilar un péndulo compuesto alrededor de su eje de suspension, se averigua lo que dura una oscilacion, y en seguida se invierte el péndulo haciéndolo oscilar alrededor del eje de oscilacion, la duracion no varía, de suerte que el eje de suspension primitivo se ha convertido en eje de oscilacion, y recíprocamente.

El capitan inglés Kater fué el primero que construyó péndulos que podian oscilar como se quisiera alrededor de dos cuchillas que desempeñaban alternativamente las veces de eje de suspension y de oscilacion, y que por ser su distancia igual á la longitud del péndulo simple tenian la misma duracion de oscilacion. Siendo una de las cuchillas movible, compréndese que sea posible hallar prácticamente ó por tanteo la posicion precisa en que las duraciones de oscilacion son iguales. Esta clase de péndulos ha recibido el nombre de *reversibles*.

Las relaciones que expresan las leyes anteriormente enunciadas suponen que el movimiento del péndulo se efectúa en el vacío. Como las observaciones se hacen al aire libre, faltaba saber si la resistencia de este flúido modifica las duraciones de oscilacion y el iso-

cronismo. El cálculo demuestra que si las amplitudes ó desviaciones van disminuyendo á causa de dicha resistencia, esta no altera en nada la duracion de la oscilacion. Cada media oscilacion descendente aumenta en duracion á consecuencia de una disminucion en la velocidad, pero la semi-oscilacion ascendente que sigue queda reducida otro tanto por la disminucion de amplitud, que procede de la resistencia misma. El isocronismo subsiste, así como la relacion entre el tiempo que dura la oscilacion, la longitud del péndulo, y la intensidad de la gravedad.

A decir verdad, la presencia del aire altera el movimiento del péndulo, haciendo que sea de distinto modo de como seria en el vacío. Más adelante se verá que todo cuerpo sumergido en un flúido (1) pierde cierta parte de su peso por efecto de un empuje que obra de abajo arriba, de suerte que es como si resultara disminuida la intensidad de la gravedad. Además, esta pérdida de peso no es la misma para un cuerpo en estado de movimiento que para uno en estado de reposo. Habrá pues que hacer una rectificacion para que sean comparables las observaciones de los péndulos refiriéndolas *al vacío*, rectificacion que dependerá de la densidad de la materia de que se compone el péndulo, comparada con la del aire.

Más adelante trataremos de las importantes aplicaciones que se han hecho de las leyes de las oscilaciones del péndulo á diferentes problemas de física terrestre, entre otros la determinacion de la intensidad de la gravedad y de sus variaciones, la de la densidad del globo, la comprobacion de las mediciones geodésicas y finalmente la del movimiento de rotacion de la Tierra. En cuanto á las aplicaciones del péndulo á la medida del tiempo, serán objeto de un artículo especial en la segunda parte de este volúmen.

Los antiguos y los modernos hasta la época de Galileo profesaban ideas erróneas acerca de la gravedad y de su modo de obrar, así como respecto de los fenómenos por ella ocasionados, y algunos de los cuales hemos recordado ya. Hemos visto tambien cómo rectificaron dichas ideas los experimentos del sabio florentino, y cómo llegó á reconocer que la desigualdad de la velocidad en la caida de los cuerpos dimanaba de la resistencia del aire. Al hacer Newton su famoso experimento de la caida de los cuerpos en el vacío confirmó aquella induccion deducida de observaciones forzosamente rudimentarias é imperfectas.

Pero en el tubo en que se puede observar el hecho de la velocidad igual de masas desiguales y de sustancias muy diferentes, no es fácil que se noten con gran precision las pequeñas desigualdades características de ciertos movimientos rapidísimos. Newton pudo solventar esta dificultad valiéndose del péndulo, para lo cual se sirvió de bolitas huecas de madera del mismo diámetro suspendiéndolas de hilos de igual longitud; luégo las hizo oscilar, depues de introducir en ellas pesos iguales de varias sustancias, como madera, hierro, oro, vidrio, sal, etc. En tales condiciones, la resistencia que el aire opone á los movimientos del péndulo es la misma en todas partes, y si la gravedad actuara en los cuerpos con arreglo á otra razon que la de las masas, claro es que la duracion de las oscilaciones hubiera sido diferente para cada clase de péndulo. El experimento hecho por Newton demostró que el número de oscilaciones en un tiempo dado era siempre el mismo.

Al mismo Galileo debemos una de las primeras aplicaciones científicas del isocronismo de las oscilaciones del péndulo, habiéndose valido de ellas para medir pequeñas duraciones y comparar las pulsaciones de las arterias. El *pulsílogo*, nombre que dió al pequeño aparato que construyó al efecto, es pues muy anterior al hermoso invento de Huygens (2) del que luégo hablaremos.

(1) Véase el cap. VI, párrafo 3, sobre el *principio de Arquímedes*

(2) «La primera aplicacion en que pensó Galileo, dice M. Bertrand, se la inspiraron sus estudios de medicina. Hacia tiempo que solia tomar el pulso á los enfermos, y áun la lengua médica era muy rica en frases y expresiones para designar el resultado de este exámen, segun sabemos por Moliére, mas por carecerse de instrumentos á propósito, no se medía la duracion exacta de una pulsacion. Entónces se le ocurrio á Galileo compararla con la de las oscilaciones de un péndulo, é ideó un mecanismo fácil de comprender, merced al cual podia alargar ó acortar el hilo de suspension para obtener la concordancia apetecida, de suerte que cuando un enfermo estaba atacado de calentura, en vez de decir como hoy: «Tiene ciento cuarenta pulsaciones por minuto,» se decia: «Marca seis pulgadas y tres líneas en el pulsílogo.» Muchos médicos célebres se apresuraron á doptar esta idea, y hasta hubo algunos que le dispensaron la honra de apropiársela.» El metrónomo, que sirve hoy para marcar los diferentes grados del movimiento ó compás en la ejecucion de las piezas de música, tiene notable analogía con el pulsílogo de Galileo.

CAPITULO VI

LA GRAVEDAD EN LOS LIQUIDOS

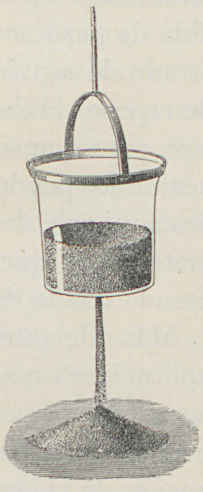
I

PROPIEDADES DE LOS CUERPOS EN ESTADO LIQUIDO

Diariamente ocurren á nuestra vista los fenómenos más curiosos y más dignos de llamarnos la atencion, sin que nos fijemos en ellos, y, con mayor motivo, sin que tratemos de averiguar las circunstancias que pueden haberlos producido. Tales son por ejemplo las múltiples apariencias con que vemos los cuerpos, ora sólidos, ora líquidos ó gaseosos, ó que pasan sucesivamente por estos tres estados. ¿Qué diferencia hay entre el hielo y el agua? ¿Cómo es que ésta se trasforma en vapor? ¿Qué diferencia existe entre la disposicion de las moléculas que constituyen las tres formas de una misma sustancia? Cuestiones son estas de dificilísima solucion, acerca de las cuales posee la ciencia un corto número de datos que tendremos ocasion de recordar en los diferentes capítulos de esta obra: por ahora nos limitaremos á completar lo que hemos dicho ya respecto de las propiedades especiales de los cuerpos líquidos comparadas con las de los sólidos, y á precisar las nociones necesarias para la mejor inteligencia de los fenómenos que vamos á describir.

Hemos dicho que lo que distingue á un cuerpo sólido es la constancia de su forma, cuando no está sometido á fuerzas mecánicas ó físicas capaces de romperle ó de hacerle pasar á un nuevo estado. Consideremos una piedra ó un trozo de metal. Son tan solidarias sus moléculas, que conservan sus mutuas distancias, sin separase unas de otras á no mediar un esfuerzo exterior más ó ménos enérgico. De aquí resulta que la posicion del centro de gravedad del cuerpo permanece invariable, y que si una piedra recibe un movimiento cualquiera, ó se la lanza al espacio, ó cae por efecto de la gravedad, todas sus moléculas participarán á la vez y del mismo modo del movimiento. Dase el nombre de *cohesion* (1) á la fuerza que reune de este modo entre sí las diferentes moléculas de un cuerpo.

Suele suceder que, cuando se reduce un cuerpo sólido á diminutas partículas, á un polvillo tenue, la cohesion de que tratamos parece, si no anulada, á lo ménos considerablemente disminuida. Así es que con trabajo se logra mantener un monton de arena en forma de cono algo elevado, pues los granos resbalan unos sobre otros, y su movimiento á lo largo de la pendiente de la masa tiene cierta analogía con la caida de un líquido por una cuesta. Esta analogía parece todavía mayor cuando se llena de polvo fino una vasija que tenga un agujero en el fondo, pues aquél sale por éste como podria salir una masa líquida (fig. 40.) Sin embargo, esta semejanza no pasa de ser aparente, pues por pequeño que sea cada grano, es en sí una masa que goza de todas las propiedades de los cuerpos sólidos, y que en realidad en nada difiere de ellos.


Fig. 40. — Salida de las materias pulverulentas.

¿Cuál es pues, físicamente considerado, el carácter especial que distingue á los líquidos de los sólidos?

Consiste este carácter en que miéntras la cohesion molecular es bastante fuerte en los

(1) Hay que distinguir con cuidado la cohesion, de esa otra fuerza que reune los átomos de las sustancias heterogéneas. Las partículas más ténues de un pedazo de yeso están reunidas en efecto por la *adhesion;* pero la *afinidad* es la que ha producido la union química de los átomos de ácido carbónico y de cal de que están formadas las partículas de yeso, así como la del oxígeno con el carbono para dar orígen al ácido carbónico, y la del oxígeno con el calcio para formar la cal.

últimos para impedir el movimiento de sus diferentes partes, en los líquidos esta fuerza es, por el contrario, nula ó casi nula. De aquí la extraordinaria movilidad de sus moléculas, que se deslizan ó ruedan unas sobre otras al impulso de la fuerza más leve. A causa de esta movilidad, ninguna masa líquida tiene en sí forma alguna definida, sino que tan luégo como se pone en equilibrio adquiere la de la vasija ó cuenca natural que la contiene, y cuyas paredes la impiden que se mueva por efecto de la gravedad.

Esto no quiere decir que la cohesion sea enteramente nula; como lo prueba el que cuando una masa líquida está en movimiento, sus moléculas cambian de sitio, pero no quedan aisladas, separadas, como si la masa fuese pulverulenta; las distancias que median entre las moléculas no varían, y aunque haya alteracion en la forma, el volúmen subsiste invariable.

Cuando se pone un disco sólido sobre la superficie de un líquido que lo moja (fig. 41), se necesita hacer algun esfuerzo para separarlo de ella, y la capa líquida que se adhiere al disco al retirarlo demuestra que ha sido necesario hacer aquel esfuerzo á causa de la fuerza que unia las moléculas líquidas entre sí. Lo propio sucederia si se introdujese una varilla en un líquido capaz de mojar la sustancia de que está aquella formada, pues al sacarla, se veria que queda suspendida de

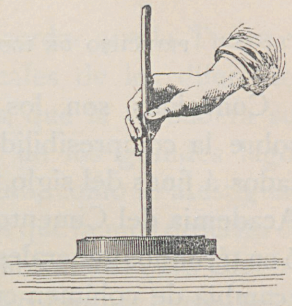


Fig. 41.—Cohesion de las moléculas líquidas

su punta una gota líquida. Finalmente, la forma esférica que tienen las gotitas de rocío depositadas en las hojas, ó las gotas de mercurio esparcidas por una superficie sólida (figuras 42 y 43), se explica únicamente por la preponderancia de la cohesion molecular sobre la gravedad, que á no ser por ella propenderia á extender las pequeñas masas líquidas de que hablamos sobre las superficies que las contienen. Sin embargo, la cohesion es muy débil, como lo prueban la movilidad de las moléculas y la facilidad con que se vence esta cohesion; una masa de agua lanzada desde cierta altura cae al suelo en forma de polvo, lo cual consiste, como hemos dicho ya, en la resistencia del aire. Por lo demás hay una gran diferencia, bajo este concepto, entre las varias clases de líquidos. Unos son viscosos, y sus moléculas cambian de sitio con suma lentitud, invirtiendo algun tiempo en adquirir la forma de las vasijas que los contienen; á esta clase pertenecen las resinas, y el azufre á determinadas temperaturas. Los cuerpos blandos vienen á formar á modo de una transicion entre los sólidos y los líquidos (1). Otros cuerpos, como los éteres, los alcoholes, son líquidos en alto grado, y hasta pasan con la mayor facilidad al estado de vapor. Por último, hay cierto número de ellos, como el agua, que ocupa un término medio entre ambos extremos. Más adelante tendremos ocasion de ver que el calor ó la presion ejercen una importantísima influencia en estos diferentes estados. Sea lo que fuere de estas diferencias, los fenómenos que vamos á

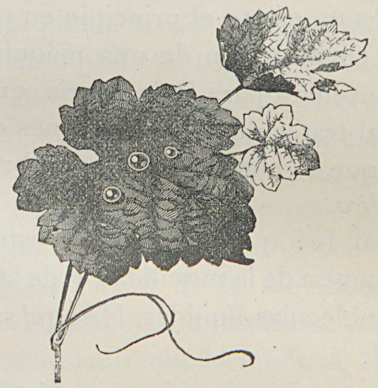


Fig. 42.—Forma esférica de las gotas de rocío

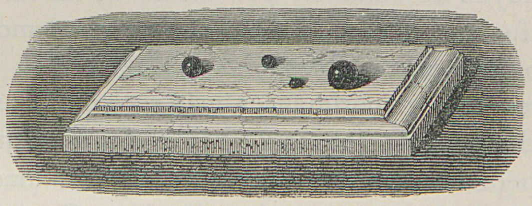


Fig. 43.—Cohesion de las moléculas: gotitas de mercurio

(1) Con una presion suficiente se puede vencer la cohesion de las moléculas que forman los cuerpos sólidos. M. Tresca ha hecho interesantes experimentos que han puesto en evidencia el hecho, paradójico en la apariencia, de que los sólidos más duros y densos pueden correr á la manera de los líquidos, sin cambiar de estado, cuando se los somete á fortísimas presiones.

estudiar se presentan en todos los cuerpos líquidos en un grado que varía con su liquidez más ó ménos perfecta.

II

PRINCIPIO DE IGUALDAD DE PRESION

Conocidos son los célebres experimentos sobre la compresibilidad de los líquidos ejecutados á fines del siglo XVIII por los físicos de la Academia del Cimento de Florencia. El agua, ó en términos generales, cualquiera masa líquida ¿cambia de volúmen cuando se la somete á una presion mecánica suficientemente considerable? Tal fué la cuestion planteada por aquellos sabios y que creyeron haber resuelto negativamente. Mandaron fabricar una esfera de plata hueca, la llenaron de agua y en seguida la taparon herméticamente: hecho esto, la comprimieron con gran fuerza, y vieron que el agua se rezumaba por las paredes de la esfera. Hicieron otros experimentos que dieron el mismo resultado, y de ellos dedujeron que los líquidos no disminuyen de volúmen por efecto de las mayores fuerzas mecánicas, ó lo que es lo mismo, que son incomprensibles.

Pero otros experimentos más recientes han invalidado los de los académicos de Florencia, quedando comprobada la compresibilidad del agua y de otros muchos líquidos. Canton en 1761, Perkins en 1819, Œrstedt en 1823, y posteriormente Despretz, Colladon, Sturm, Wertheim y Regnault han medido con precision cada vez mayor la reduccion de volúmen que experimentan diferentes líquidos sometidos á una presion determinada. Con todo, ya tendremos ocasion de ver que esta reduccion es sumamente escasa, y tanto, que se puede hacer caso omiso de ella en el estudio de los fenómenos de hidrostática. Procedamos, pues, á la descripcion de los principales de ellos.

Supongamos dos cilindros de diámetro desigual y puestos en mutua comunicacion por medio de un tubo que une sus bases (fig. 44). En el interior de cada uno de ellos pueden funcionar dos émbolos perfectamente calibrados, y toda la capacidad del tubo y de los cilindros comprendida debajo de los émbolos está llena de agua. Para que en tal estado haya equilibrio en el aparato, la experiencia demuestra que si la carga del émbolo del cilindro menor, unida á su propio peso, es por ejemplo de 1 kilógramo, el émbolo mayor deberá tener una carga, comprendido su peso, de tantas veces 1 kilógramo cuantas equivalga la superficie de seccion del cilindro mayor á la del menor. En el ejemplo representado por la figura 44, 1 kilógramo sirve de equilibrio á 16.

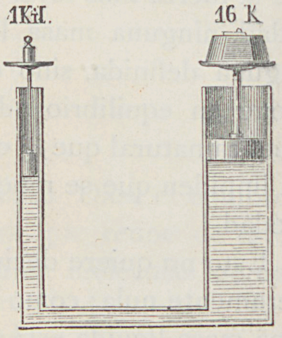


Fig. 44.—Principio de la prensa hidráulica

¿No ocurre aquí todo exactamente como si la presion ejercida en la superficie del cilindro menor se trasmitiera, sin cambiar de energía y atravesando el líquido, á cada elemento igual de la superficie del cilindro mayor?

Tal es en efecto el principio en que está basada la construccion de una máquina de grandísima utilidad para la industria, que describiremos al tratar de las aplicaciones de la gravedad, y que se conoce con el nombre de *prensa hidráulica.*

Pascal fué quien descubrió este principio, consecuencia de la movilidad y de la elasticidad de las moléculas líquidas. Hé aquí su enunciado general:

Toda presion ejercida eu un líquido contenido en una vasija cerrada por todas partes se trasmite con igual energía en todos sentidos. Esto significa que si se toma en el líquido ó en las paredes interiores de la vasija una superficie igual á aquella por la cual se ejerce la presion, esta superficie experimentará una presion rigorosamente igual á la primera; si la superficie que recibe la presion es doble, triple, cuádruple, etc., de la que la trasmite, aquella soportará una presion doble, triple ó cuádruple tambien.

Así pues, si en las paredes de la vasija se abren orificios de cualesquiera dimensiones, para mantener el equilibrio será menester ejercer en los émbolos que cierran dichos orificios, presiones proporcionales á su superficie (fig. 45). El enunciado del principio supone que el líquido no es pesado, ó que se hace abstraccion de la gravedad. Para poderlo comprobar prácticamente, hay que tener en cuenta, al evaluar las presiones

ejercidas ó trasmitidas, las que proceden de la gravedad, presiones que el líquido ejerce en sí mismo ó en las paredes de la vasija por su propio peso. El experimento indicado más arriba (fig. 44) y realizado industrialmente en la pren-

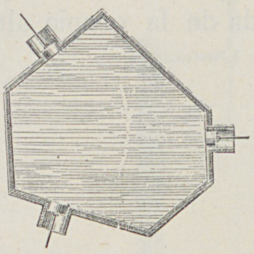


Fig. 45. — La presion ejercida en un punto de una masa líquida se trasmite por igual en todos sentidos

sa hidráulica, es una consecuencia evidente del principio de Pascal.

Hemos visto, y es un hecho de observacion del que cualquiera puede cerciorarse, que la direccion de la plomada es perpendicular á la superficie de un líquido en reposo. Fácilmente se comprende que no puede ser de otro modo.

En efecto, cuando por una causa cualquiera, la superficie de una masa líquida no es plana y horizontal, una molécula, como por ejemplo M (fig. 46) se halla colocada como sobre un plano inclinado, y en virtud de la movilidad propia de los líquidos, propende á deslizarse por la pendiente de este plano obedeciendo á su propio peso; siendo imposible el equilibrio hasta que, cesando la causa de la agitacion del líquido, se nivele poco á poco su superficie, y vuelva á ser rigurosamente plana y horizontal. Rara vez están tranquilas las grandes superficies

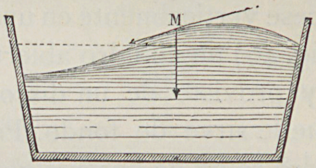


Fig. 46. — La superficie de los líquidos en equilibrio es horizontal

líquidas de los mares, de los lagos y hasta de las balsas. Las agitaciones del aire, grandes vientos ó leves brisas, bastan para producir esa multitud de prominencias movedizas llamadas oleadas, olas ó simples arrugas. Pero, si en vez de considerar solamente una porcion limitada, abarcamos con la vista ó con la imaginacion una extension de suficiente radio, ó si la contemplamos desde alguna distancia, las desigualdades se disipan en su conjunto, la masa líquida permanece en reposo, y su superficie tiene toda la apariencia de un plano perfectamente horizontal.

Con todo, debemos recordar que la Tierra es esferoidal, que las verticales de los diferentes lugares no son paralelas, que la verdadera superficie de los mares y de los grandes lagos participa de su curvatura, como lo atestiguan varios fenómenos ópticos que hemos descrito en una de nuestras obras anteriores (El Cielo). Pero esto mismo viene á confirmar la condicion esencial del equilibrio de una masa líquida contenida en una vasija y sometida á la sola accion de la gravedad

Así pues, la superficie exterior del líquido está siempre á nivel, ó si se quiere, plana y horizontal. Esto en cuanto á su exterior. Veamos ahora lo que pasa en el interior.

III

PRESION DE LOS LÍQUIDOS EN EL FONDO DE LAS VASIJAS

Como cada molécula líquida es pesada, se puede considerar su peso como una presion que se ejerce verticalmente, y que debe trasmitirse en todos sentidos á las demás partes del líquido, así como á las paredes de la vasija que lo contiene. ¿Cuál es la resultante de las presiones de todas estas moléculas? La experiencia va á decírnoslo.

Valgámonos de un recipiente cilíndrico, sin fondo, sostenido en un trípode de cierta altura (fig. 47). Un disco plano pendiente de un hilo sujeto á uno de los brazos de una balanza, á guisa de platillo, se aplica exactamente sobre los bordes del cilindro, de modo que le sirve de fondo. Pónese en el otro platillo una tara igual á la diferencia de su peso con el del disco, y por último se agregan pesas marcadas que elevando el disco ú obturador, le adaptan exactamente á los bordes del cilindro: en seguida se echa agua en este último. La presion del líquido sobre el fondo movible aumenta poco á poco; y cuando llega á ser igual á las pesas añadidas, el menor exceso de líquido hace que baje el obturador y que se escape el agua, mas como la presion disminuye á causa de este desagüe, el disco vuelve á subir y aplicarse contra el ci-

lindro. La punta de un tornillo que roza la superficie del agua marca el nivel de esta en el momento del equilibrio.

De este primer experimento resulta, como ya debia suponerse, que *la presion ejercida en el fondo de la vasija es precisamente igual al peso del líquido.*

Si repetimos ahora el experimento con una vasija del mismo fondo que el cilindro, pero ensanchada por su parte superior, y por consiguiente de mucho mayor volúmen, tendremos exactamente el mismo resultado, es decir, que las mismas pesas sirven de equilibrio á una columna líquida de la propia altura. Tambien

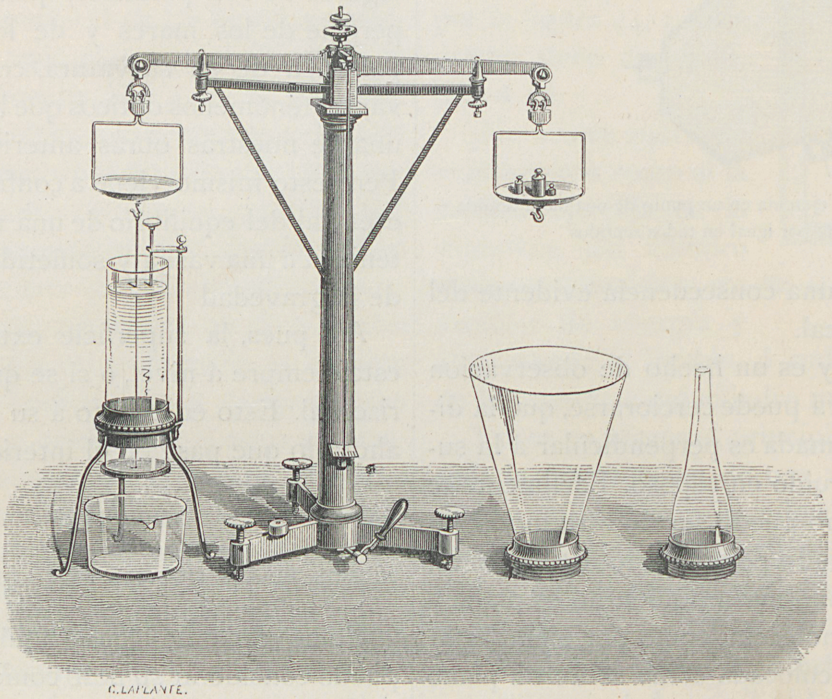


Fig. 47. — Presion de un líquido sobre el fondo de la vasija que lo contiene

se obtiene idéntico resultado si la vasija es más angosta por arriba, con tal que la superficie de la base ó fondo siga siendo la misma.

Así pues, la presion ejercida por el peso de un líquido sobre el fondo de la vasija que lo contiene, es independiente de la forma de aquella, proporcional á la altura del líquido, é igual al peso de un cilindro líquido que tenga por base el fondo y la misma altura.

La demostracion experimental de la primera parte de esta ley se hace con el aparato de Haldat; pero no se obtiene directamente con él la medida de la presion, como en el primer método, sino que esta se conoce por la elevacion de una columna de mercurio en un tubo acodado verticalmente, como lo demuestra la figura 48.

Si en vez de averiguar el valor de la presion sobre el fondo de la vasija, se quisiera conocer la ejercida en la superficie de una capa líquida interior ó contra las paredes laterales de aquella, se veria que, á igualdad de superficie y á la misma profundidad, esta presion es la misma, midiéndose tambien por el peso de una columna líquida vertical que tenga la superficie comprimida por base y por altura la del líquido.

El experimento siguiente es la demostracion de la ley relativa al caso de una superficie tomada en una capa horizontal interior.

Introdúcese verticalmente en una vasija llena de agua (fig. 49) un cilindro abierto en sus dos extremos y provisto de un disco ú obturador movible que le sirve de fondo. Para sumergir dicho cilindro se ha de hacer alguna fuerza, lo cual prueba que el líquido ejerce una presion ó *empuje* de abajo arriba, que mantiene el obturador adherido á los bordes del cilindro é impide que el agua se introduzca en él. Si entónces se echa agua en el tubo, persistirá el equilibrio miéntras el nivel interior esté más elevado que el exterior; pero en el momento en que haya igualdad entre los niveles, — ó, mejor dicho, un poco ántes á causa del peso del disco, — este último cede y queda roto el equilibrio. Se da

siempre el mismo resultado, cualquiera que sea la profundidad á que se sumerja el cilindro. De aquí se deduce esta ley:

La presion ejercida en un punto cualquiera de una misma capa horizontal de un líquido en equilibrio bajo la sola accion de la gravedad, es constante, y se mide por el peso de una columna líquida que tenga por base el elemento de superficie comprimido, y por altura la profundidad vertical de la capa.

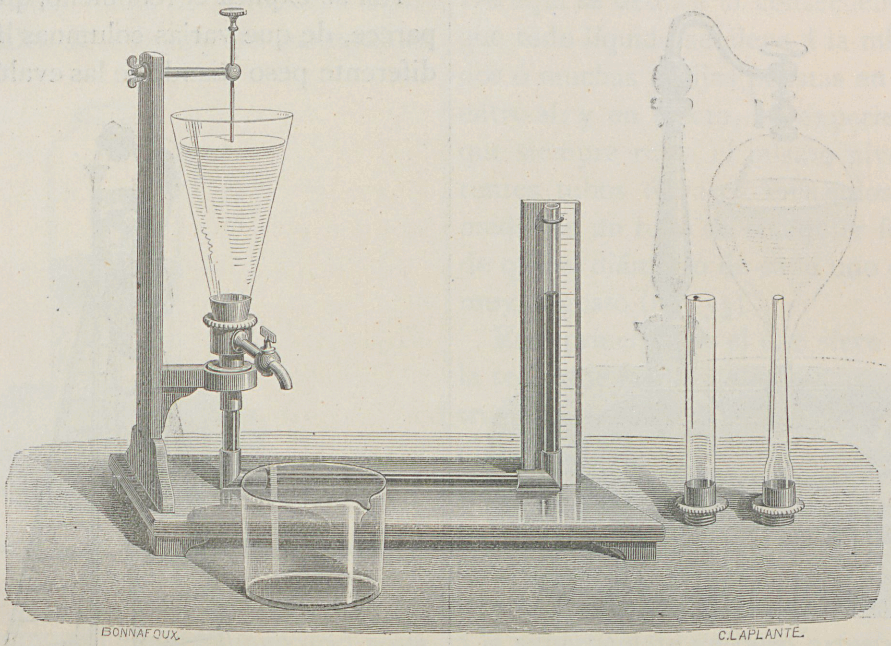


Fig. 48.—Presion de un líquido sobre el fondo de una vasija: aparato de Haldat

Del propio modo se miden las presiones laterales en las paredes de las vasijas. Debemos añadir que su esfuerzo es siempre normal, es decir, perpendicular á la superficie de dichas paredes, de suerte que se ejercen en sentido inverso de la gravedad si la pared es horizon-

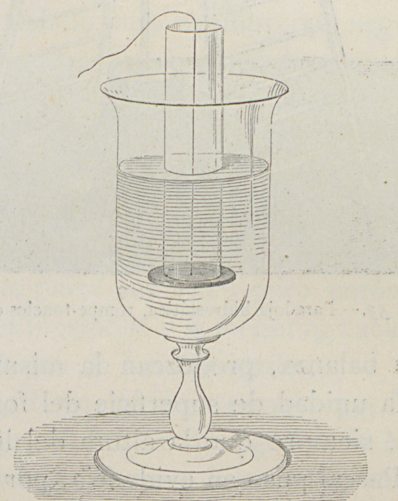


Fig. 49.—Presion de una masa líquida sobre una capa horizontal

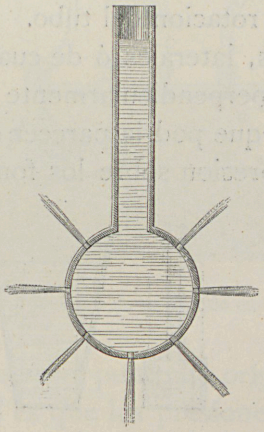


Fig. 50.—Presion normal de los líquidos en las paredes de las vasijas

tal y superior al líquido. Haremos mencion de los siguientes experimentos que comprueban el efecto y sentido de estas presiones.

Si se llena de agua un cilindro terminado en una esfera metálica que tenga algunos agujeros en todas direcciones (fig. 50), brota el líquido por todos ellos, siendo la direccion del chorro perpendicular á la porcion de superficie de la cual se escapa. En las bombas de regadera, el agua brota en virtud de la propiedad que tienen los líquidos de comprimir lateralmente las paredes de los recipientes que los contienen.

El torniquete hidráulico (fig. 51) demuestra á la vez la presion lateral ejercida en dos opuestas direcciones y en los dos extremos de un tubo horizontal acodados en sentido contrario. Si este tubo no estuviese abierto, la presion

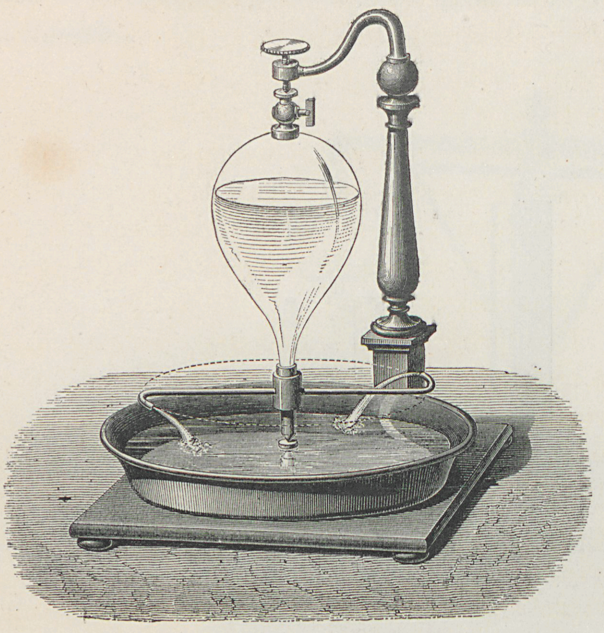


Fig. 51.—Torniquete hidráulico

lateral ejercida en el extremo estaria contrabalanceada por otra presion igual y contraria sobre el codo, y el tubo permaneceria inmóvil. Pero el orificio practicado en cada extremo produce dos chorros de líquido, y no estando ya contrabalanceada la presion en uno y otro codo, resulta un movimiento de retroceso y por consiguiente de rotacion del tubo.

Las presiones, laterales ó de cualquier otra clase, ejercidas perpendicularmente á las paredes, explican lo que podria parecer singular en la igualdad de presion sobre los fondos de re-

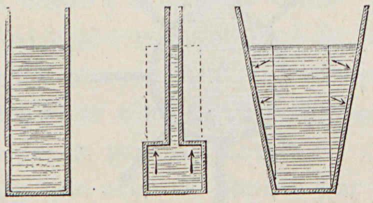


Fig. 52.—Paradoja hidrostática

cipientes de distintas formas. En una vasija cónica ensanchada por su parte superior, las paredes laterales son las que soportan el exceso del peso total del líquido sobre el del cilindro que mide la presion ejercida en el fondo. En una vasija de menor diámetro en su parte superior, las paredes sufren presiones en una direccion contraria á la de la gravedad, y cuya suma es precisamente igual á lo que falta al volúmen líquido para formar el cilindro cuyo peso equivale á la presion sobre el fondo horizontal de la vasija (fig. 52).

Así se explica el fenómeno, que tan singular parece, de que varias columnas líquidas, de tan diferente peso cuando se las evalúa en el platillo

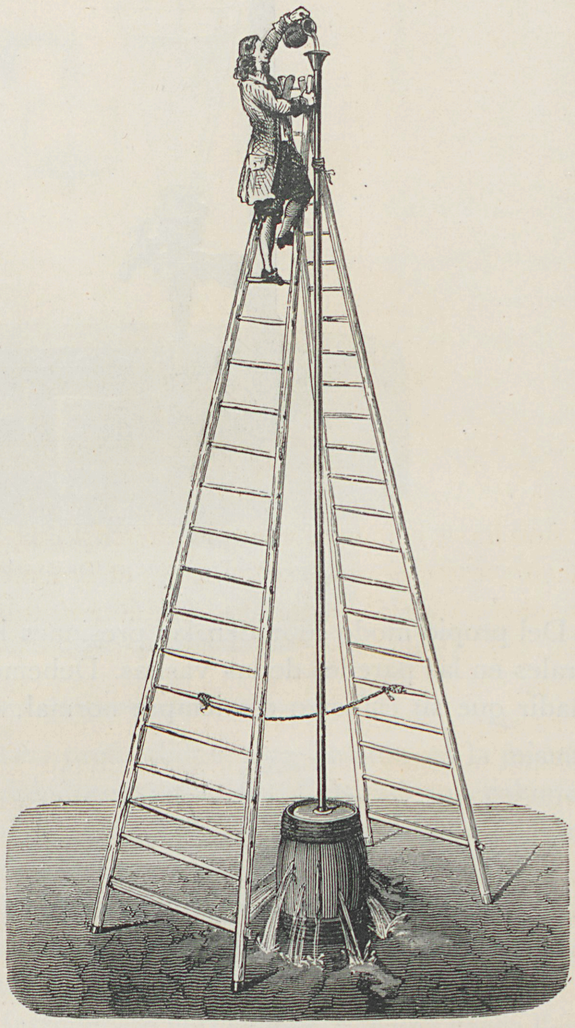


Fig. 53.— Paradoja hidrostática, rompe-toneles de Pascal

de una balanza, produzcan la misma presion sobre la unidad de superficie del fondo de las vasijas, siempre que la altura del líquido sea igual. Pascal puso en evidencia, por medio de un curioso experimento, este fenómeno, conocido con el nombre de *paradoja hidrostática;* hizo que se abrieran las duelas de un tonel sólidamente construido y lleno de agua y por cuya cubierta superior penetraba un tubo muy estrecho y muy alto, y esto sin más que llenar de agua el tubo, es decir, añadiendo al peso total un peso insignificante (fig. 53). Las paredes del tonel soportaban entónces las mismas presiones

que si hubiesen tenido encima una masa de agua cuya base fuera la superficie del tonel y su altura la del tubo. Un kilógramo de agua puede producir de este modo el mismo efecto que millares de kilógramos.

Si en una misma vasija se introducen líquidos de densidades diferentes y no susceptibles

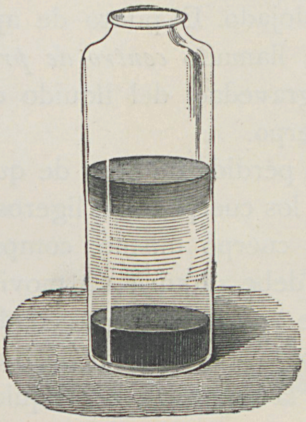


Fig. 54.—Equilibrio de los líquidos superpuestos de densidades diferentes

de mezclarse, como por ejemplo, mercurio, agua y aceite, estos líquidos se colocan por órden de densidad. Además, cuando se establece el equilibrio (fig. 54), las superficies de separacion son planas y horizontales. Este caso práctico podria preverse por el raciocinio, porque requiriendo un líquido aislado para equilibrarse, segun hemos visto, que su superficie sea horizontal, este equilibrio no se rompe cuando la superficie soporta además en todos sus puntos las presiones emanadas del líquido superpuesto. Mediante algunas precauciones se pueden equilibrar dos líquidos de densidad casi igual, poniendo el más pesado en la parte superior; pero entónces el equilibrio es inestable, y la menor agitacion restablece el órden de las densidades.

El agua de mar es más pesada que la dulce; así es que en los *fiordos* ó golfos de Noruega se ven masas de agua dulce acarreadas por los rios, las cuales se mantienen en la superficie del agua salada sin mezclarse con ella. Vogt asegura que una de estas masas tenia en un fiordo 1m,30 de profundidad. Semejante fenómeno no es posible sino en los lugares tranquilos, pues la agitacion causada por los vientos mezcla en breve el agua dulce con la salada. Háse observado el mismo caso en el Támesis, á causa de llevar las mareas el agua del mar á una distancia bastante grande por el lecho del rio.

El equilibrio de un líquido contenido en una vasija y sometido á la sola accion de la gravedad es independiente de la forma de aquella. De aquí se deduce la consecuencia natural de que todo líquido se eleva á la misma altura en dos ó muchas vasijas puestas en comunicacion entre sí; y en efecto, la experiencia confirma que siempre reina el mismo nivel en los diferentes tubos ó vasos enlazados entre sí por medio de un tubo de cualquier forma, con tal de que el diámetro de cada uno de ellos no sea muy angosto (fig. 55).

Este principio es el que sirve de base para la teoría de los pozos artesianos, para la construccion de las fuentes de surtidor en los jardidines públicos ó particulares, y para la distribucion de las aguas en las ciudades. En la segunda parte de este volúmen trataremos de estas aplicaciones interesantes; por ahora sólo nos interesa el principio teórico. El agua que llega á la superficie de un pozo artesiano suele proceder de capas líquidas muy lejanas, que forman á modo de rios subterráneos, y cuyo nivel es

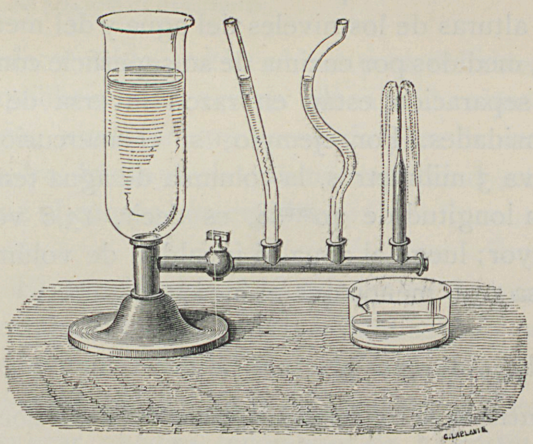


Fig. 55.—Igualdad de altura de un líquido en los vasos comunicantes

más elevado en el punto de orígen que en el de llegada. Así es que las presiones se trasmiten de trecho en trecho, y el chorro que resulta subiria precisamente á la altura misma que el manantial de orígen á no ser por la resistencia del aire y por los roces que la columna ascendente sufre en su trayecto. Lo propio sucede con los surtidores que brotan de un receptáculo más alto que el estanque y que comunican con él por conductos subterráneos.

Si dos vasijas puestas en comunicacion están llenas de líquidos de densidad diferente, las alturas ya no son iguales (fig. 56).

Echemos primero mercurio, y veremos que el nivel se establece á la misma altura en los dos tubos. Echemos ahora agua en el tubo de la izquierda: el mercurio subirá en el de la de-

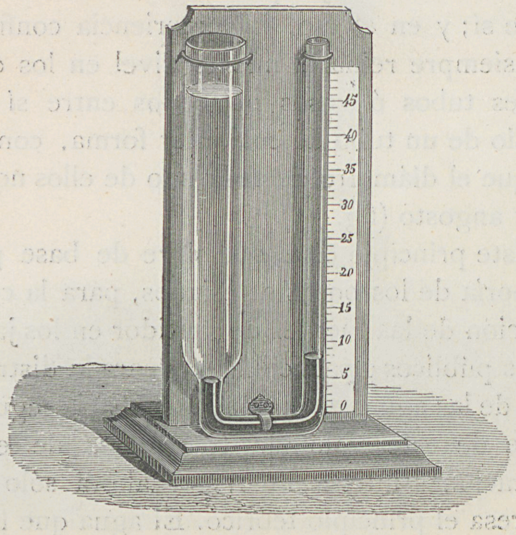


Fig. 56.—Vasos comunicantes. Altura de dos líquidos de densidades diferentes

cha por efecto de la presion del nuevo líquido. Establecido el equilibrio, fácilmente se ve que las alturas de los niveles del agua y del mercurio, medidos por encima de su superficie comun de separacion, están en razon inversa de sus densidades. Por ejemplo, si el mercurio se eleva 3 milímetros, la columna de agua tendrá una longitud de $40^{mm},8$, es decir, 13,6 veces mayor; luego el agua, á igualdad de volúmen, pesa 13,6 ménos que el mercurio.

VI

EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS SUMERGIDOS EN LOS LÍQUIDOS —PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Nadie ignora que cuando se sumerge en el agua un cuerpo más ligero que ella, como un pedazo de madera ó de corcho, es menester cierto esfuerzo para mantenerlo debajo de la superficie. Si se abandona el objeto á sí mismo, se eleva verticalmente y sale á la superficie en la cual flota, en parte sumergido y en parte fuera del agua.

¿Cuál es la causa de un fenómeno tan conocido? La gravedad. En el aire, el mismo cuerpo abandonado á sí mismo cae verticalmente; en el agua, las presiones laterales, las presiones de arriba abajo y de abajo arriba se destruyen en parte, reduciéndose á un empuje ejercido en sentido inverso de la direccion de la gravedad, empuje al que ya hemos aludido en un experimento anteriormente descrito (fig. 49). Demuéstrase, y la práctica confirma la teoría, que el empuje es precisamente igual al peso del líquido desalojado. El punto de aplicacion de esta fuerza, llamado *centro de presion*, es el centro de gravedad del líquido cuyo puesto ocupa el cuerpo.

Siendo la pérdida de peso de que hablamos superior en los cuerpos más ligeros que el agua al peso del cuerpo mismo, comprendese que este último debe adquirir un movimiento contrario al que le daria la gravedad, de lo cual resulta la ascension de un pedazo de madera ó de corcho á la superficie del líquido. Pero los cuerpos más pesados que el agua sufren tambien semejante pérdida, sea además cualquiera la naturaleza del líquido en que se los introduzca. Sabido es que Arquímedes, uno de los más grandes geómetras y físicos de la antigüedad, tuvo la gloria de descubrir este principio, que lleva su nombre, y cuyo enunciado general es el siguiente:

Todo cuerpo sumergido en un líquido pierde una parte de su peso igual precisamente al del líquido desalojado.

El principio de Arquímedes se demuestra experimentalmente con la balanza hidrostática.

Este aparato consiste en una balanza comun, cuyos dos platillos están provistos de un gancho en su cara inferior. Del gancho de un platillo se cuelga un cilindro hueco cuya capacidad debe ser tan rigurosamente igual al volúmen de otro cilindro macizo, que este quepa exactamente en él. Ambos cilindros están á su vez provistos de ganchos, de suerte que se puede suspender el macizo del hueco (fig. 57). Hecho esto, se levanta la cruz de la balanza por medio de la cremallera ó barra dentada adaptada á ella, subiéndola lo suficiente para que se pueda colocar un vaso lleno de agua debajo de los dos cilindros, cuando la cruz está perfectamente horizontal.

Para establecer el equilibrio, se ponen pesas en el platillo opuesto. Si entónces se baja la cruz de la balanza, el cilindro macizo se hunde

en el agua y queda roto el equilibrio, inclinándose el fiel hácia el platillo que contiene las pesas. Esto sólo bastaria para demostrar el empuje vertical ó la pérdida de peso del cuerpo sumergido. Para medir este empuje, se sumerge enteramente el cilindro macizo, y luégo se restablece el equilibrio vertiendo poco á poco agua en el cilindro hueco. La cruz recobra la posicion horizontal tan luégo como el cilindro hueco está enteramente lleno de líquido.

Así pues, la pérdida de peso es justamente igual al peso del agua que se ha echado, es decir, de la desalojada por el cuerpo sumergido. El experimento que precede demuestra

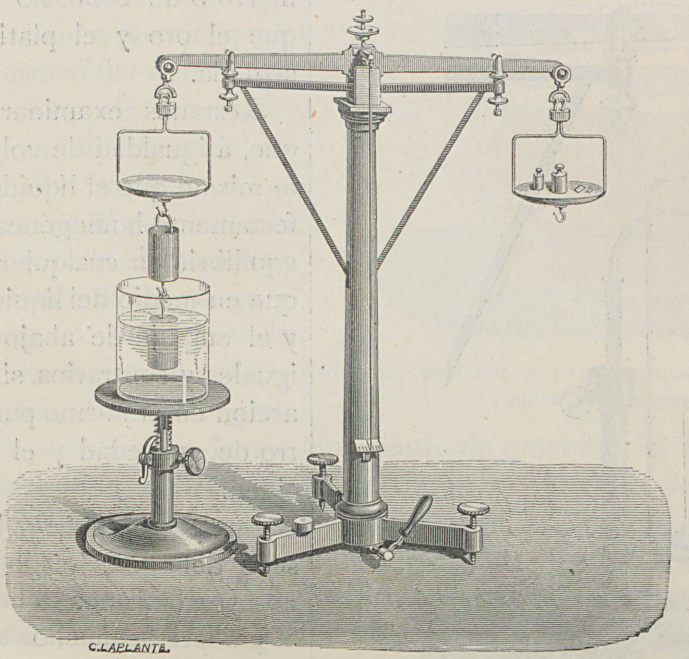


Fig. 57.—Demostracion práctica del principio de Arquímedes

pues el principio de Arquímedes con toda evidencia.

Ahora bien: ¿en qué consiste que no se rompe el equilibrio cuando, despues de equilibrar un vaso lleno de líquido y un cuerpo sólido puestos uno junto á otro en el platillo de una balanza, se sumerge el cuerpo sólido en el agua? Acabamos de demostrar que este último pierde de su peso, y sin embargo el equilibrio subsiste. Es absolutamente preciso que el vaso y su contenido hayan aumentado en un peso equivalente, ó si se quiere, que el agua sufra una presion de arriba abajo igual á la ejercida por ella de abajo arriba. Esto es lo que sucede efectivamente y lo que se puede comprobar con el aparato ántes descrito.

Se pesa un vaso lleno en parte de agua, y luégo se introduce en él el cilindro macizo sostenido exteriormente, como se ve en la figura 58. Queda roto el equilibrio: la balanza se inclina hácia el lado del vaso. ¿Cuánto ha aumentado el peso del agua por la inmersion? Precisamente el equivalente al del agua desalojada; y así lo prueba el que para restablecer el equilibrio basta extraer del vaso el volúmen de agua estrictamente necesario para llenar el cilindro hueco de la misma capacidad exterior que el cuerpo sumergido.

El principio de Arquímedes es de gran importancia teórica. Merced á él se han podido deducir las condiciones de equilibrio de los cuerpos sumergidos ó de los cuerpos flotantes, explicar muchos fenómenos de hidrostática, y resolver numerosos problemas del mayor interés práctico. Citaremos algunos ejemplos que así lo demuestran, tomándolos de las observaciones más comunes.

En los fenómenos que se presentan en el seno de los líquidos encontramos á cada paso testimonios fehacientes del empuje ó presion á que hemos hecho referencia. Si cuando tomamos un baño comparamos el esfuerzo que necesitamos hacer para levantar un miembro dentro del agua, con el que debemos emplear para levantarlo fuera del líquido, nos llamará

la atencion la diferencia que advertiremos en favor del primer movimiento. Dentro del agua podemos remover y levantar fácilmente piedras muy voluminosas que con dificultad sostendríamos fuera de ella. Cuando penetramos en un rio cuya profundidad aumenta gradualmente, sentimos que disminuye poco á poco

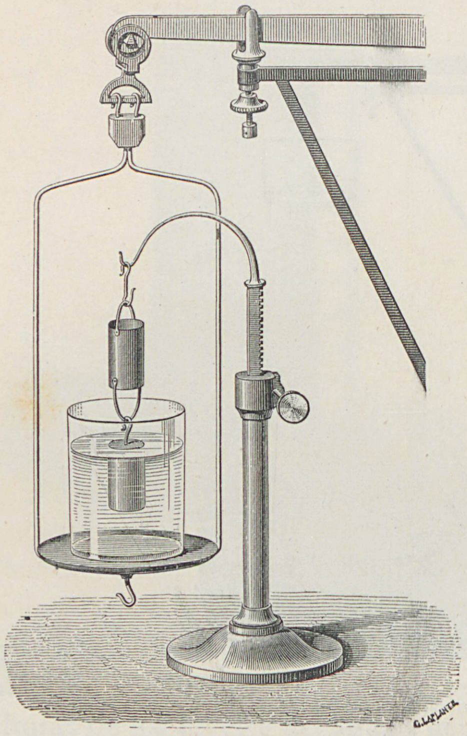


Fig. 58.—Principio de Arquímedes. Reaccion de un cuerpo sobre el líquido en que está sumergido

la presion de nuestros piés sobre el fondo; hasta que llega un momento en que ya no podemos fijarlos en el suelo para seguir adelante. Nuestro cuerpo, cuyo peso queda casi anulado por el empuje del líquido, propende á tomar una posicion horizontal, exigida por el equilibrio inestable en que á la sazon se encuentra.

Esto nos induce á decir algunas palabras acerca de las condiciones de equilibrio de los cuerpos sumergidos en los líquidos, ó capaces de flotar en su superficie.

Desde luégo es evidente que un cuerpo sumergido no puede estar en equilibrio si su peso excede al de un volúmen igual de líquido, pues en tal caso cae por efecto de la accion de este exceso de peso sobre el empuje del agua. Tampoco subsistirá en equilibrio si su peso es menor que un volúmen igual de líquido; en esta hipótesis subirá á la superficie á causa del predominio del empuje sobre su peso. Por esta razon sobrenadan el corcho, la madera, á lo ménos ciertas especies de ella, miéntras que la mayoría de los metales, las piedras y una porcion de sustancias se van al fondo. Como el mercurio es un líquido de mucha densidad, la mayor parte de los metales pueden flotar en su superficie: una bala de plomo, un pedazo de hierro ó de cobre no se hunden en él, al paso que el oro y el platino, se van al fondo en seguida.

Réstanos examinar el caso de un cuerpo que, á igualdad de volúmen, pese exactamente lo mismo que el líquido. Si su sustancia es perfectamente homogénea, el cuerpo permanece en equilibrio en cualquier posicion que se le coloque en medio del líquido. En este caso, el peso y el empuje de abajo arriba no tan sólo son iguales y contrarios, sino que ambos ejercen su accion en el mismo punto, es decir, que el centro de gravedad y el centro de presion coinciden.

Los peces suben y bajan á su albedrío en el seno del agua. Largo tiempo se ha creido, y nosotros mismos lo hemos repetido siguiendo el parecer de muchos sabios físicos ó fisiólogos, que lo que hace posible estos diferentes movimientos, es la facultad que tienen estos animales de comprimir ó hinchar una especie de bolsa elástica llena de aire, colocada en el abdómen. Segun el volúmen de la *vejiga natatoria* —tal es el nombre de este órgano—el cuerpo del pez será, ó más ligero ó más pesado que el volúmen de agua que desaloja; en el primer caso sube, en el segundo baja. Pero en la actualidad parece demostrado que no son tales las funciones de la vejiga natatoria. No cabe duda de que se dilata y se comprime; pero este cambio de volúmen no es un fenómeno voluntario que puede producir el animal segun sus necesidades de locomocion. En realidad la vejiga se dilata cuando el pez se eleva sobre cierto nivel en el cual se halla en equilibrio, gracias á la igualdad de su densidad con la del agua. Entónces, en efecto, si se eleva, la presion del líquido disminuye, ocurriendo la expansion del gas contenido en el órgano bajo la influencia de esta disminucion. Pero si el pez desciende bajo el nivel de equilibrio, como la presion exterior aumenta, la vejiga se contrae, y siendo ya más denso que el agua, caeria hasta el fondo si per-

maneciera inmóvil: por lo cual se remonta de nuevo merced á sus esfuerzos musculares.

Los experimentos recientes del fisiólogo M. A. Moreau han puesto en evidencia que los peces no pueden aumentar ó disminuir á su albedrío el volúmen de su vejiga, como se creia hasta aquí. Pero lo que sí es cierto, y esto nos basta para la cuestion que consideramos, es que si cambia el volúmen de la vejiga por cualquier circunstancia, como la densidad del animal varía en sentido inverso, resultan de esta variacion movimientos que son una confirmacion del principio de Arquímedes. Por ejemplo, si se coloca un pez en un aparato en el que llegue la presion á cinco ó seis atmósferas, se entorpece hasta el punto de caer al fondo de la vasija y de no poder elevarse en seguida sino á costa de enérgicos esfuerzos musculares. Por el contrario, cuando un pez ha mordido el anzuelo á gran profundidad, se remonta á pesar suyo á la superficie, áun cuando consiga desprenderse de aquel en el camino. Acontece entónces que la vejiga revienta por efecto de una expansion excesiva, saliendo las vísceras fuera del cuerpo del animal. Debemos añadir que no á todos los peces les sucede esto, pues algunos de ellos, como las rayas, los tiburones, las lampreas, el escombro del Océano, etc., no tienen vejiga. De todos modos resulta que el calificativo de *natatoria*, aplicado á la vejiga de los peces, es inexacto.

M. Delaunay cita en su *Curso de mecánica* un fenómeno bastante curioso que se explica fácilmente por el principio de Arquímedes:

«Cuando se introduce una uva en una copa llena de Champagne, dice, esta uva cae inmediatamente al fondo de la copa. Pero el ácido carbónico que se desprende continuamente del vino, se acumula en breve en forma de burbujillas alrededor del grano. Formando cuerpo estas burbujas de gas con la uva, aumentan su volúmen sin que su peso crezca de un modo notable; el empuje del líquido, que al principio era menor que el peso del grano, no tarda en sobreponerse á este, y el grano sube hasta la superficie del Champagne. Si se da entónces una ligera sacudida á la uva para desprender las burbujas de ácido carbónico que se habian adherido á su superficie, baja de nuevo al fondo de la copa; y al cabo de algun tiempo, vuelve á subir otra vez. De este modo puede continuarse el experimento, miéntras siga desprendiéndose ácido carbónico.»

Si el cuerpo sumergido no es homogéneo, si, por ejemplo, es un compuesto de corcho y plomo, cuyo peso total sea el del agua desalojada (fig. 59), sin que los dos cuerpos tengan el mis-

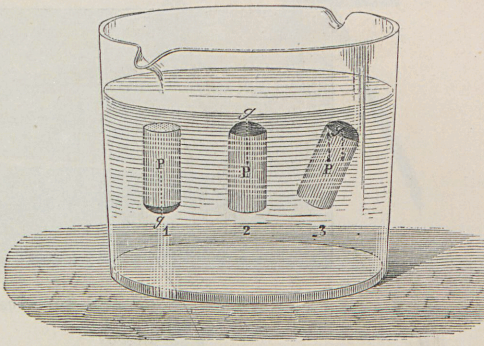


Fig. 59. — Equilibrio de un cuerpo sumergido en un líquido de la misma densidad que la suya

mo centro de gravedad, el centro de gravedad *g* del conjunto, y el centro de presion P no coinciden ya. Para que haya equilibrio es menester que ambos puntos estén en una misma vertical, como en las posiciones 1 y 2; y por otra parte, el equilibrio seria inestable si el centro de gravedad estuviese en la parte superior. Como la posicion 3 no reune esta condicion, tampoco habrá equilibrio hasta que el cuerpo, despues de algunas oscilaciones, haya tomado la posicion 1.

Cuando un cuerpo desaloja un volúmen de líquido cuyo peso es superior al suyo,—lo cual puede consistir en la diferencia de densidades ó en la forma del cuerpo,—flota á la superficie.

En este caso, el agua desalojada por la parte sumergida, equivale, en cuanto á su peso, al del cuerpo juntamente con el de la carga que soporta; así por ejemplo, el casco de un buque, y su cargamento en hombres, material y mercancías, pesan reunidos precisamente lo mismo que el volúmen de agua de mar desalojado debajo de la línea de flotacion. Por otra parte, la segunda condicion de equilibrio es tambien la misma, esto es, que el centro de gravedad del cuerpo y el de presion deben estar en una misma vertical. Mas por lo que hace á la estabilidad, no es indispensable ya que el primer punto esté debajo del otro. Además, segun la posicion del cuerpo flotante y su forma, la del volúmen

desalojado cambia á su vez, variando tambien el centro de presion, de suerte que las condiciones de equilibrio varían naturalmente á cada momento.

Jamás existe en los buques un equilibrio perfecto, rigurosamente hablando, ni áun cuando el mar está terso y tranquilo. Siempre hay en ellos oscilaciones de mayor ó menor amplitud, por lo cual claramente se comprende que lo esencial es que, en las circunstancias más desfavorables, los movimientos del barco no sean tan bruscos que lo hagan zozobrar.

En los mares inmediatos á los polos, se encuentran con frecuencia grandes masas de hielo, conocidas de los marinos que navegan por aquellas regiones con el nombre de *icebergs* (montes de hielo). Por lo general son enormes fragmentos desprendidos de los espacios de mar helados, ó que se han deslizado al mar desde los glaciares del polo.

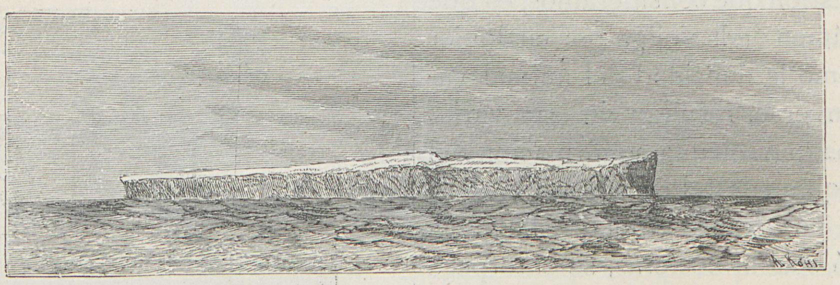


Fig. 60.—Icebergs de las regiones australes

No es raro encontrar algunas de estas masas flotantes que se elevan, ora presentando formas regulares (fig. 60), ora cual fantásticas arcadas, á alturas que varían entre 30 y 60 metros sobre el nivel del mar. Ahora bien, partiendo de la ley de equilibrio de los cuerpos flotantes, y considerando que la densidad del hielo no excede de 0,918, al paso que la del agua de mar es de 1,026, debe deducirse que la parte sumergida del iceberg tiene un volúmen siete ú ocho veces igual al de la masa emergida, y por consiguiente un témpano de forma regular de 30 á 60 metros de altura, tendrá un espesor total de 250 á 500 metros.

CAPÍTULO VII

GRAVEDAD DEL AIRE Y DE LOS GASES

I

EL AIRE Y LOS DEMÁS GASES SON PESADOS, ELÁSTICOS Y COMPRESIBLES

Vivimos en el fondo de un océano flúido, cuya profundidad media es por lo ménos cien veces mayor que la de los mares, y que envuelve por todas partes al esferoide terrestre. La sustancia de que está formado este mar es el aire, mezcla de varias sustancias gaseosas, siendo las dos principales el oxígeno y el nitrógeno; tambien contiene ácido carbónico, vapor de agua y á veces amoniaco, mas en proporciones variables, al paso que los dos primeros gases se encuentran en la misma relacion en todas partes. Esta relacion es, poco más ó ménos, en un volúmen igual á 100, de 21 de oxígeno y 79 de nitrógeno.

Nadie ignora que el aire es el alimento indispensable de la respiracion de los animales; y hasta los que viven en el agua no pueden pasar sin él; otro tanto debemos decir respecto de los vegetales que, bajo la influencia de la luz, descomponen el ácido carbónico del aire, absorben el carbono y restituyen el oxígeno, tan necesario para la respiracion animal.

No es posible ver el aire, á lo ménos en un espacio de reducida extension, á causa de su gran trasparencia; pero á largas distancias, la interposicion de las capas gaseosas es muy perceptible, y comunica á los cuerpos remotos, á las montañas que limitan el horizonte, una tinta

azulada, más brillante y más pura en el color del cielo, cuando ninguna nube empeña la atmósfera. Sin el color azul de esta, el cielo seria incoloro, es decir, enteramente negro; y las estrellas brillarian en él en mitad del dia. Por la noche, como la cubierta aérea no está ya iluminada por los rayos del sol, sino tan sólo por los tenues resplandores de la luna ó de las estrellas, parece de color azul oscuro; y si de dia ascendemos á una altísima montaña, observamos el mismo fenómeno, porque siendo ménos espesas y ménos densas las capas de aire que gravitan sobre ella, no absorben sino una escasa porcion de los rayos azules de la luz solar.

Otros fenómenos, que percibimos merced al sentido del oído y al del tacto, nos revelan además la existencia del aire. Cuando este se halla en reposo, bástanos ponernos en movimiento para sentir su presencia. Su masa resiste á la dislocacion que la imprimimos, resistencia que advertimos en nuestras manos y rostro. Pero todavía se echa mucho más de ver la materialidad del aire en los movimientos de que él á su vez está dotado; desde las brisas más leves hasta los impetuosos vientos de los huracanes y de las tempestades, todas las agitaciones atmosféricas son pruebas continuas de su existencia.

Por último, gracias á las vibraciones comunicadas al aire por los cuerpos sonoros, se propaga el sonido hasta nuestros oídos, y áun él mismo, cuando se le pone en vibracion en condiciones á propósito, se convierte en productor del sonido, como lo veremos en la segunda parte de este tomo. Háse sacado partido de la mayor parte de las propiedades del aire; en otro lugar describiremos muchas de sus numerosas é interesantísimas aplicaciones.

El objeto principal de este capítulo será el estudio de las propiedades del aire considerado como cuerpo pesado, así como tambien el de los fenómenos dimanados del peso ó gravedad del aire ó de las demás sustancias gaseosas; porque *el aire es pesado*, como fácilmente se comprenderá mediante un sencillo experimento.

En breve describiremos el aparato que sirve para extraer de una vasija ó recipiente el aire que contiene, para *hacer el vacío*, como dicen los físicos. Este aparato es el que se conoce con el nombre de máquina neumática. Por ahora diremos que si se toma un globo de cristal provisto de un cuello metálico con una llave, y se le pesa despues de haber hecho en él el vacío (fig. 61), basta abrir la llave y dejar que

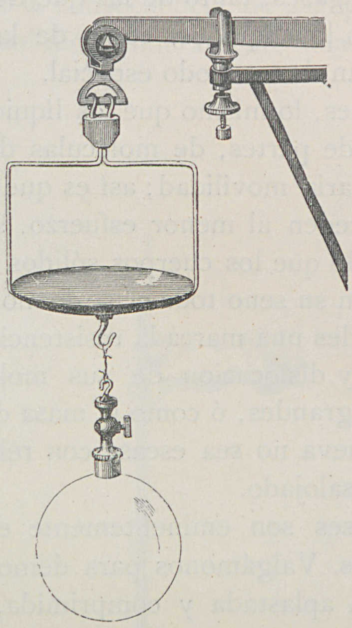


Fig. 61.—Demostracion práctica del peso del aire y de los gases

el aire penetre para que el fiel de la balanza se incline hácia el lado del globo. Para restablecer el equilibrio roto, hay que añadir pesas marcadas, es decir $1^{gr},29$ próximamente por cada litro de que se compone la capacidad del globo.

Hé aquí pues directamente demostrada la gravedad del aire. El mismo experimento, hecho con otros gases, demostraria del propio modo que los cuerpos en estado gaseoso están sometidos, como los líquidos y los sólidos, á la accion de la gravedad. Galileo fué el primero que demostró la importante verdad de que el aire es pesado (1); pero Otto de Guericke, inventor de la máquina neumática, ideó el experimento que acabamos de indicar.

Si el aire contenido en una vasija es pesado; si se puede valuar su peso por medio de la balanza, el inmenso volúmen de aire que descansa en el suelo debe comprimirlo en proporcion de

(1) Los antiguos presumieron la gravedad del aire, pero no pudieron comprobarla prácticamente. Aristóteles dice en su tratado *de Cœlo:* «Cuando todos los cuerpos están en su lugar propio, son pesados, todos excepto el fuego. *Hasta el aire mismo es pesado.* La prueba está en que un odre lleno de aire pesa más que uno vacío....» Por desgracia, era imposible realizar esta prueba, toda vez que un odre lleno ó vacío, pesado en el aire no podia indicar más que el peso de su cubierta.

la masa atmosférica, y esta presion, que sin duda es enorme, no puede manifestarse sino con fenómenos perceptibles. Así sucede en efecto, mas, ántes de estudiar estos fenómenos, digamos unas cuantas palabras sobre las propiedades de los gases, tanto de las que disfrutan en comun con los líquidos, como de las que los caracterizan de un modo especial.

Los gases, lo mismo que los líquidos, están formados de partes, de moléculas dotadas de extraordinaria movilidad; así es que las masas gaseosas ceden al menor esfuerzo, se dividen permitiendo que los cuerpos sólidos ó líquidos efectúen en su seno toda clase de movimientos, sin oponerles una marcada resistencia como la velocidad y dislocacion de sus moléculas no sean muy grandes, ó como la masa del cuerpo que se mueva no sea escasa con relacion á la del gas desalojado.

Los gases son eminentemente elásticos y expansibles. Valgámonos para demostrarlo de una vejida aplastada y comprimida, que por consiguiente no contendrá más que un volúmen de aire muy reducido si se le compara con la capacidad que tendria la misma vejiga inflada (fig. 4). En tal estado, el aire interior no aumenta de volúmen, porque la fuerza elástica de que están dotadas sus moléculas y que vamos á hacer ostensible, está equilibrada por la presion del aire exterior. Pongamos ahora esta vejiga bajo la campana de la máquina neumática. Conforme se va haciendo el vacío, la vejiga aumenta de volúmen, se infla y hasta llega á romperse á causa de la presion interior que dilata sus paredes. Si se da entrada al aire en dicha campana, recobra aquella prontamente su volúmen primitivo, lo cual prueba que el aire es *elástico* y *compresible* á la vez. Lo mismo sucederia con cualquier otro gas.

Con el *eslabon neumático* se comprueban tambien ambas propiedades. Introduciendo un émbolo bien calibrado y engrasado en un tubo de cristal lleno de aire (fig. 62), se experimenta una resistencia débil pero creciente, y se ve que el volúmen del aire disminuye en una mitad, en dos tercios, etc., primera operacion que prueba la gran compresibilidad del gas. Si al llegar el émbolo á la parte inferior de su curso se le abandona á sí mismo, vuelve á subir espontáneamente, prueba no ménos cierta de la elasticidad del aire. Como esta compresion desarrolla calor, se hace uso de este instrumento para encender un pedazo de yesca puesto debajo del émbolo, sólo que la compresion ha de ser en este caso algo brusca. De aquí procede el nombre de *eslabon neumático* que se ha dado á este pequeño instrumento.

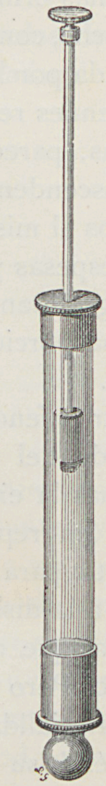


Fig. 62—Eslabon neumático

Así, pues, los gases son elásticos y compresibles como los líquidos, mas al paso que esta última propiedad es muy reducida en los segundos, los primeros la tienen en alto grado. Notemos además que si la cohesion de las moléculas líquidas es casi nula, en los gases esta cohesion no existe; al contrario, sus moléculas tienen propension á repelerse, contrabalanceándola solamente una presion exterior. De aquí resulta que si llega á disminuir esta presion, el volúmen de gas aumenta; pero en los líquidos, el volúmen es constante, á lo ménos miéntras el cuerpo conserva el mismo estado.

Finalmente, lo que distingue tambien á los líquidos de los gases, es la escasísima densidad comparativa de estos últimos, pues miéntras que un litro de líquido pesa 13,596 gramos (peso de un litro de mercurio) y no baja de 715 gramos (éter), el de un litro de gas ó de vapor no excede de 20 gramos y baja hasta 9 centígramos.

Por lo demás, tanto en los gases como en los líquidos, el principio de igualdad de presion y el de la igualdad de trasmision de las presiones en todos sentidos, los indica del propio modo la teoría y los comprueba la práctica; en breve tendremos ocasion de presentar algunos ejemplos de ello. Volvamos ahora á ocuparnos de los fenómenos ocasionados por la gravedad.

II

PRESION ATMOSFÉRICA

Hemos visto que Galileo fué el primero que demostró esta gravedad, siendo muy conocida la historia de tan importante descubrimiento.

En 1640, los fontaneros de Florencia encargados de construir una bomba en el palacio del gran duque, se quedaron sorprendidos al ver que, no obstante las buenas condiciones del aparato, el agua no quiso elevarse hasta el extremo superior de la bomba, es decir, á más de 32 piés (unos $10^{m},3$). Los ingenieros y académicos florentinos consultados acerca de semejante anomalía, no supieron á qué atribuirla, y entónces se recurrió á Galileo, que á la sazon tenia setenta y seis años, y cuya inmensa reputacion de saber no habia sufrido menoscabo á consecuencia de las persecuciones. Galileo dió primeramente una respuesta

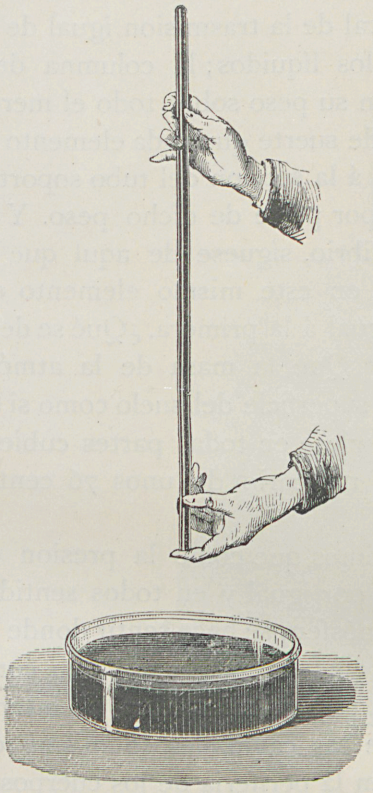


Fig. 63.—Experimento de Torricelli

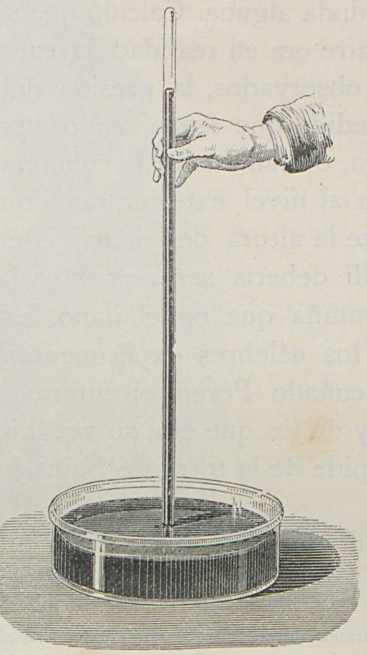


Fig. 64.—Experimento de Torricelli: efecto de la gravedad atmosférica

evasiva, pero el problema planteado le hizo reflexionar; presumió que la presion del aire era la causa que hace subir el agua hasta dicha altura, y que el *horror de la naturaleza al vacío* era una explicacion vana y ociosa, por cuanto hubiera sido preciso suponer que no manifestaba este horror más allá de una altura determinada. Empezó pues por comprobar la gravedad del aire, pesando una botella en la que hizo el vacío por medio del vapor procedente de la ebullicion de cierta cantidad de agua, y luégo dejó que su discípulo Torricelli llevara más adelante la comprobacion de sus conjeturas.

Un año despues de la muerte de Galileo, ocurriósele á Torricelli la idea de examinar qué resultaria introduciendo en un espacio vacío un líquido mucho más denso que el agua, el mercurio.

Tomó un largo tubo cerrado por un extremo y lo llenó de dicho líquido; en seguida, tapando con el dedo el extremo abierto del tubo, para impedir que el mercurio se vertiera y el aire penetrara, introdujo dicho extremo en una vasija llena de mercurio, y abandonando entónces el líquido á sí mismo, mantuvo el tubo en posicion vertical (figs. 63 y 64). Torricelli vió que el líquido descendia y que, despues de oscilar un tanto, se detenia á un nivel que subsistió casi invariable á 28 pulgadas (76 centímetros) próximamente sobre el nivel del mercurio de la vasija.

Si la idea de Galileo era exacta, y la presion atmosférica la que mantenia en efecto la columna de agua á 32 piés de altura, la misma presion debia elevar el mercurio, que es trece veces y media más pesado que el agua, á una altura igual número de veces menor. Ahora bien, 28 pulgadas son en efecto una longitud

trece veces y media menor que 32 piés. Tal es, en su sencillez, este gran descubrimiento; tal es el tubo de Torricelli, ó como se le llama en nuestros dias, el *barómetro*, instrumento que sirve para medir la presion de la atmósfera.

Gran trabajo le costó á Torricelli el vencer la resistencia que opusieron los sabios de su época á sus explicaciones sobre la elevacion del agua y del mercurio (1). Pero los nuevos experimentos ideados por Pascal, no dejaron ya lugar á duda alguna. Calculó que si la gravedad del aire era en realidad la causa de los fenómenos observados, la presion deberia ser menor á medida que fuese mayor la altura de la atmósfera, ó bien menor la columna gaseosa sobrepuesta al nivel exterior del líquido. Por consiguiente la altura del mercurio en el tubo de Torricelli deberia ser menor en la cumbre de una montaña que en el llano. Este fué el orígen de los célebres experimentos que encargó á su cuñado Perier ejecutara en el Puy de Dôme, y de los que él á su vez hizo al pié y en la cúspide de la torre de Saint-Jacques la Boucherie.

Los resultados fueron de todo punto conformes á las previsiones deducidas de la nueva teoría (2).

La altura del mercurio en el tubo de Torricelli es independiente del diámetro de este, con tal que este diámetro no sea muy pequeño; porque en tal caso, otras fuerzas que estudiaremos influyen sobremanera en los niveles de los líquidos. Este resultado es una consecuencia natural de la trasmision igual de las presiones en los líquidos; la columna de mercurio actúa con su peso sobre todo el mercurio de la cubeta, de suerte que cada elemento de superficie igual á la seccion del tubo soporta la misma presion por parte de dicho peso. Y como está en equilibrio, síguese de aquí que la presion del aire en este mismo elemento es precisamente igual á la primera. ¿Qué se debe deducir de esto? Que la masa de la atmósfera pesa sobre la superficie del suelo como si esta superficie estuviese en todas partes cubierta de una capa de mercurio de unos 76 centímetros de altura.

Añadamos que como la presion del aire se trasmite por igual y en todos sentidos, el peso de la atmósfera se hace sentir donde quiera que el aire penetre y permanezca en comunicacion con la atmósfera misma, en el interior de las casas, de las cavidades, lo mismo que al aire libre y en la periferia de los cuerpos. Esto explica por qué los cuerpos situados en la tierra no resultan aplastados por tan enorme presion, que no baja por término medio de 10,333 kilógramos por cada superficie de un metro cuadrado.

Siendo la superficie del cuerpo humano de metro y medio cuadrado, poco más ó ménos, en una persona de estatura regular y de mediana corpulencia, todos soportamos respectivamente una carga equivalente á 15,500 kilógramos.

Acabamos de dar la razon de que semejante carga no nos aplaste contra el suelo; esto es,

---

(1) «La naturaleza huye del vacío, no puede sufrir el vacío, tiene horror al vacío. *Fuga vacui; non datur vacuum in rerum natura.*» Tales eran las fórmulas mediante las cuales se creia explicar suficientemente, ántes de la época de Pascal, el movimiento ascendente del agua en las bombas, la introduccion del aire en un fuelle, la del mismo en los pulmones, y otros muchos fenómenos cuya causa mecánica es la presion del aire. Dícese que Descartes atribuia, desde 1638, al peso del aire la subida del agua en las bombas. Lo cierto es que el P. Mersenne dió noticia á Pascal del experimento de Torricelli, que data de 1643 y que se conoció en Francia al año siguiente. El P. Mersenne habia tratado de reproducirlo sin lograrlo, pero durante un viaje que hizo á Roma tuvo ocasion de conocer exactamente sus condiciones. Pascal, no bien las supo, repitió muchas veces los experimentos de Italia, é hizo otros varios que le revelaron la verdadera causa del fenómeno, esto es, la gravedad del aire. Valióse al efecto de diferentes líquidos de distintas densidades, como aceite, agua y vino, y vió que las alturas estaban en razon inversa de las densidades. Por último, concibió y ejecutó ó hizo ejecutar los famosos experimentos que prueban que la presion del aire disminuye á medida que uno se eleva en la atmósfera. Despues de explicar el experimento llevado á cabo en el Puy de Dome, Pascal se expresa en estos términos contra las tradiciones inveteradas de la rutina escolástica: «Querido lector, la aquiescencia universal de los pueblos y la muchedumbre de filósofos contribuyeron á que se arraigase el principio de que ántes sufriria la naturaleza su destruccion propia que el menor espacio vacío. No han faltado hombres de superior talento que se resistieran á llevar la cuestion á tal extremo, pues si bien han creido que la naturaleza tiene horror al vacío, han supuesto sin embargo que esta repugnancia tenia sus límites, y que podia ser vencida por alguna violencia; pero nadie hasta ahora se ha atrevido á sostener lo siguiente: que la naturaleza no siente repugnancia alguna al vacío, que no hace ningun esfuerzo para evitarlo, y que lo admite sin dificultad y sin resistencia.»

(2) «He ideado, escribia Pascal á Perier, un experimento que podrá disipar todas las dudas, si se ejecuta con precision. Que se haga la prueba del vacío muchas veces, en un mismo dia, con el mismo azogue, al pié y en la cumbre de la montaña del Puy que está junto á nuestra ciudad de Clermont. Si, como presumo, la altura del azogue es menor arriba que abajo de la montaña, resultará que la gravedad ó presion del aire es la única causa de la suspension del azogue y no el horror al vacío, toda vez que es indudable que hay mucho más aire que pese al pié de la montaña que no en su cima, y nadie podrá decir que la naturaleza aborrece el vacío en un punto más que en otro.»

la de que todas las presiones ejercidas sobre cada punto de nuestro cuerpo se equilibran mutuamente. Pero lo que á primera vista parece incomprensible es que no nos estruje el esfuerzo de esas presiones contrarias. La razon, sin embargo, es muy obvia; todos los flúidos contenidos en nuestro organismo ejercen una reaccion contra la presion de la atmósfera, y esta reaccion incesante explica nuestra insensibilidad natural, y la falta de los fenómenos que podria hacernos presumir la presion del aire. Por lo demás, dicha reaccion no es una simple hipótesis, como lo prueba la aplicacion de ventosas, ó sea de esos vasitos de metal ó vidrio que



Fig. 65.—Pascal

en caso necesario nos ponemos sobre la piel; pues cuando se hace el vacío en su interior, la piel se infla, las venillas estallan, y la sangre afluye, porque la presion atmosférica no la mantiene ya contenida en los vasos capilares.

Para hacer patente la energía de la presion atmosférica, se ejecutan en las cátedras de física algunos experimentos interesantes que describiremos rápidamente.

Uno de los más antiguos es el de los hemisferios de Magdeburgo, cuyo descubrimiento se debe á Otto de Guericke.

Consiste en dos hemisferios de cobre que encajan uno en otro formando una esfera hueca y que se adaptan por medio de una llave al conducto de la máquina neumática (fig. 66). Miéntras están llenos de aire, basta el más ligero esfuerzo para separarlos, pero cuando se hace el vacío en el interior de la esfera, es menester un gran esfuerzo para desprenderlos, como se comprenderá fácilmente si se tiene en cuenta que la presion ejercida por el aire sobre dos hemisferios de 2 decímetros solamente de diámetro es ya de 324 kilógramos en cada uno de ellos. En uno de los experimentos que el ilustre burgomaestre de Magdeburgo llevó á cabo, hizo que tiraran de cada hemisferio cuatro vigorosos caballos que no pudieron separarlos: siendo el diámetro de 65 centímetros, la presion era de 3,428 kilógramos en cada uno de ellos, ó sea 6,856 kilógramos

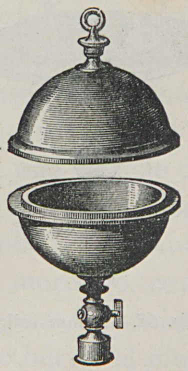


Fig. 66.—Hemisferio de Magdeburgo

de presion total. La presion total en las superficies de los hemisferios es dos veces mayor de la que indican estas cifras; pero aquí no se trata más que de la suma de las ejercidas en la direccion de las resistencias, las cuales equivalen en cada lado á la presion sobre un círculo del mismo diámetro que la esfera.



Fig. 67.—Prueba de la presion atmosférica

Si se llena de agua hasta los bordes un vaso, y se aplica sobre la superficie del líquido una cartulina ó una hoja de papel, se puede volver el vaso sin que el agua se vierta, como se ve en la figura 67; la presion atmosférica mantiene el papel adherido al líquido y sostiene el peso de este último sin ninguna dificultad, pues el papel no produce en este caso otro efecto sino impedir la division de las moléculas de la columna líquida.

El experimento del rompe-vejigas consiste en hacer el vacío en una vasija cuya boca se haya tapado con una membrana bien estirada, la cual impide que el aire penetre en el vaso. A medida que se va haciendo el vacío, se va deprimiendo la membrana por efecto de la presion atmosférica hasta que por fin estalla (figura 68). Una fuerte detonacion, parecida á la de un pistoletazo, acompaña á la rotura, detonacion que reconoce por causa la brusca entrada del aire en la capacidad vacía del vaso.

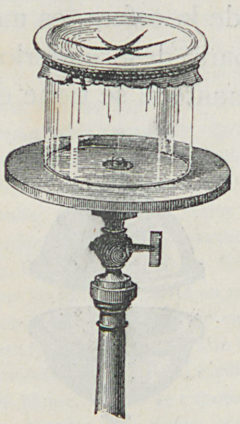


Fig. 68.—Rompe-vejigas

Si se aplica una fruta, por ejemplo una manzana, contra los delgados bordes de un tubo de metal y se hace en seguida el vacío en este tubo, el peso de la columna atmosférica comprime la manzana, los bordes del tubo la recortan y de este modo penetra en el interior del mismo. Tal es el experimento del *corta-manzanas*.

Por último, se hace otro no ménos curioso que demuestra la presion del aire en la superficie de los líquidos. Colócase un fanal ó campana cilíndrica de cristal sobre una armadura metálica provista de un tubo con una llave, merced á la cual se la puede aplicar á la máquina neumática y extraer el aire contenido en la campana. Hecho ya el vacío, se introduce el extremo

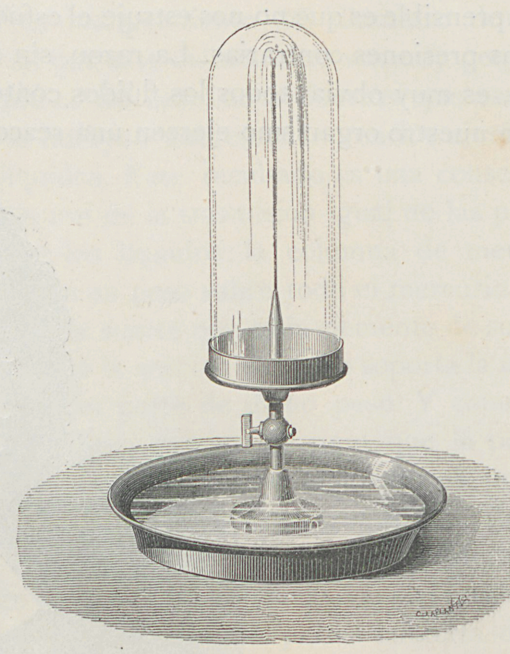


Fig. 69.—Surtidor en el vacío

inferior del tubo en una cubeta llena de agua, y abriendo entónces la llave del tubo, se pone en comunicacion el interior del recipiente con el líquido. La presion atmosférica ejercida sobre el agua de la cubeta hace al punto brotar un chorro que llega hasta las paredes superiores del fanal (fig. 69).

III

EL BARÓMETRO

En todo cuanto precede hemos supuesto que el peso de la columna de aire era la única causa de la presion atmosférica, que esta presion era constante, y que en una superficie dada, equivalia al peso de una columna de agua de $10^{m},33$ ó al de otra de mercurio de 76 centímetros, que tuviera la misma seccion que la superficie. Pero la experiencia prueba que esta presion está sujeta á variaciones, áun cuando la altitud del lugar no varíe. Más adelante estudiaremos estas variaciones en su relacion con los fenómenos meteorológicos; mas para esto es preciso disponer de un instrumento que las consigne. Este instrumento, que en principio es el tubo de Torricelli, y que lleva el nombre de *barómetro*, merece que lo describamos detalladamente, debiendo advertir que se le ha construido de

varios modos, segun el uso á que se le destinaba.

El barómetro más sencillo y más exacto á la vez consiste en un tubo de vidrio ó de cristal, perfectamente recto, cilíndrico por lo regular y sumamente homogéneo, de un diámetro un tanto grande, por ejemplo, de 2 á 3 centímetros. Despues de llenarlo de mercurio, se le introduce en una cubeta que contenga el mismo metal, y tanto esta como el tubo están sujetos á una

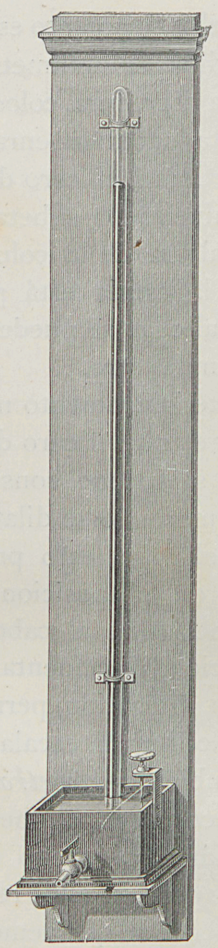


Fig. 70.—Barómetro normal ó fijo

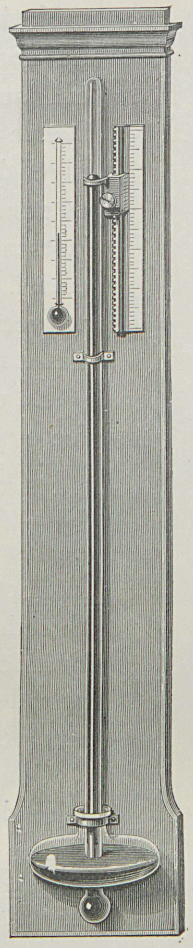


Fig. 71.—Barómetro de cubeta

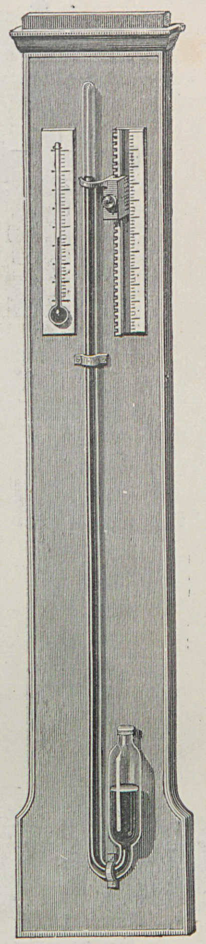


Fig. 72.—Barómetro de sifon

tablilla vertical fija en el sitio donde se han de hacer las observaciones. Como se ve, este barómetro no es otra cosa que un tubo de Torricelli. Mas para instalarlo hay que tomar algunas precauciones de cuya importancia es fácil penetrarse, y que tambien son necesarias para la construccion de las demás clases de barómetros.

Una de las más esenciales es que el mercurio empleado sea de gran pureza, lo cual se consigue disolviendo con ácido nítrico el óxido de mercurio ó las partículas de metales heterogéneos que pudiera contener el líquido. Otra de las condiciones indispensables es que no contenga burbujas de aire, pues estas, por su ligereza específica, podrian subir á lo largo de las paredes del tubo, por el espacio vacío que lleva el nombre de *cámara barométrica*. Como el vapor de agua y el aire son gases elásticos, comprimirian el nivel superior del tubo, de suerte que la altura del mercurio no indicaria la presion atmosférica. Para obviar este inconveniente, se empieza por limpiar y secar perfectamente el tubo ántes de llenarlo. Una vez lleno, se hace hervir el líquido poniendo el tubo sobre una especie de parrilla inclinada que contenga en toda su longitud brasas de carbon. El tubo se calienta progresivamente, así como el mercurio, cuya temperatura se eleva hasta un punto próximo á la ebullicion; entónces se hace hervir el mercurio, progresivamente tambien y partiendo de la base, avivando el fuego, hasta que desaparezcan todas las burbujas de aire que contiene el líquido ó que quedan adheridas al tubo. En este momento el mercurio debe presentar el

aspecto de un espejo sumamente terso, de un brillo vivo y metálico, indicio de pureza perfecta é indispensable en semejante circunstancia.

El tamaño del diámetro del tubo que forma

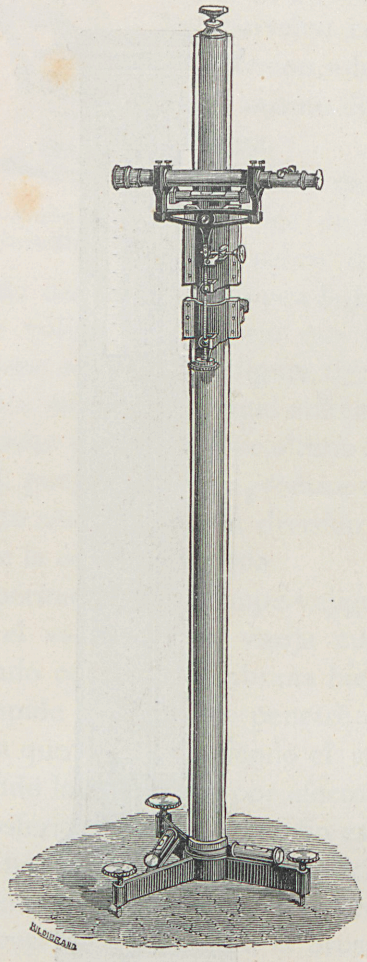


Fig. 73.—Catetómetro

el barómetro *fijo* ó *normal* tiene sobre los tubos más estrechos la ventaja de facilitar á la columna mercurial un nivel no alterado por las fuerzas moleculares, que constituyen la *capilaridad*. Así pues, para conocer la altura del barómetro, bastará medir la distancia vertical que media entre dicho nivel y el del mercurio en la cubeta, lo cual se hace con el *catetómetro* (fig. 73), que se compone esencialmente de una regla dividida, en la cual se mueve un anteojo horizontal.

En la figura 70, que representa un barómetro fijo, se ve un tornillo de doble punta adaptado á la cubeta. La punta inferior debe rasar la superficie del mercurio, lo cual es fácil realizar por medio del tornillo, siendo la distancia de la punta superior (punta que el dibujante se ha olvidado de figurar) al nivel del tubo la que da el catetómetro. Añadiendo á ella la longitud constante del tornillo, se tiene la altura ó la presion atmosférica buscada.

El barómetro de cubeta se distingue del anterior en que, presentando la cubeta una gran superficie (fig. 71), el nivel del mercurio se considera en él como si fuera constante. La tabla á que está fijo el instrumento está provista de una escala dividida en milímetros, por la cual sube y baja una corredera, colocada de tal suerte que su arista superior enrase con el nivel del mercurio. Como el cero de la escala es por hipótesis el nivel de la cubeta, se lee en la escala misma la altura de la columna mercurial. Por último, la escala está provista de un vernier, merced al cual se pueden apreciar hasta fracciones de milímetro.

Lo que hace á este instrumento ménos perfecto que el anterior es que el cero de la escala ó nivel de la cubeta se supone constante, pero como el cristal y el mercurio se dilatan á causa de las variaciones del calor, esto produce asimismo variaciones en la posicion del cero. Sucede con frecuencia que al cabo de cierto tiempo, estas variaciones accidentales acaban por determinar una alteracion permanente, y entónces hay que rectificar la escala.

Constrúyense tambien *barómetros de sifon*, ó de dos brazos encorvados, el menor de los cuales es de un diámetro mucho más ancho que el otro (fig. 72); pero en ellos resalta todavía más el inconveniente de que hemos hablado, como no se reduzca el observador á tomar siempre por altura la diferencia de los niveles del mercurio en los dos brazos.

Los barómetros de Fortin, de Gay-Lussac y de Bunten no presentan estos inconvenientes; el diámetro del tubo es ménos ancho que en el barómetro fijo, de suerte que la capilaridad deprime el nivel superior del mercurio. Así pues, las observaciones que se hacen con dichos instrumentos requieren una correccion relativa á esta clase de influencia. Pero tanto en los barómetros de Gay-Lussac y de Bunten como en el fijo, se mide la altura por dos lecturas correspondientes á los dos niveles del líquido, de suerte que despues de hechas todas las correcciones, la diferencia expresa la verdadera presion atmosférica. En el de Fortin se mantiene el cero constante, gracias á una disposicion muy ingeniosa que se comprenderá fácilmente

examinando la figura 75. Esta figura representa la seccion vertical de la cubeta cilíndrica que contiene el mercurio en el cual penetra la parte aguzada del tubo. La superior del cilindro es de cristal y en ella se ve el nivel del líquido. Una punta metálica interior indica la posicion del cero de la escala y el nivel á que debe llegar el mercurio, siempre que se trate de hacer una observacion. Como el mercurio descansa en un saco de piel impermeable sujeto á las paredes



Fig. 74.—Instalacion del barómetro de Fortin

inferiores de la cubeta, y el fondo metálico está atravesado por un tornillo cuya extremidad se apoya en el saco móvil, resulta de aquí que se puede subir y bajar como se quiera el fondo del líquido, ó lo que es igual, subir ó bajar el nivel hasta que enrase con la punta metálica. Para que los movimientos del mercurio no rompan el tubo cuando se va de viaje, se introduce el tornillo hasta que la cubeta queda enteramente llena por su parte superior.

Como todo el aparato va metido en un cilindro de bronce que lo resguarda de los choques, obsérvase el nivel del mercurio en el tubo al través de dos hendiduras longitudinales opuestas que dejan en descubierto el cristal del tubo, y en los bordes de estas hendiduras están grabadas en milímetros las divisiones de la escala, que tiene su cero en el nivel constante marcado por la punta metálica de la cubeta. Un anillo provisto de un vernier (fig. 76) y de un boton que permite moverle por medio de una barra dentada, da la posicion precisa del nivel en la escala y la altura en décimos de milímetro.

El aparato se instala en el suelo puesto en un trípode, debiéndose tener siempre cuidado de colocar el tubo en una posicion vertical, lo cual se consigue por el método de suspension *á la Cardan*, llamado así del nombre de su inventor.

El barómetro de Fortin es cómodo para las exploraciones científicas, porque el aire no pue-

de introducirse en él, y porque no está expuesto á romperse con los movimientos y agitaciones del camino. Hay que tener en cuenta la capilaridad para corregir las lecturas. Además, como el grado de temperatura hace variar la densidad del líquido y por consecuencia la altura de la columna que mide la presion atmosférica, se ha de hacer tambien una correccion relativa á esta influencia.

La figura 77 representa el barómetro de Gay-Lussac modificado por Bunten. Consiste este barómetro en dos porciones de un mismo tubo unidas por otra más estrecha ó capilar; una pequeña abertura practicada en la porcion más

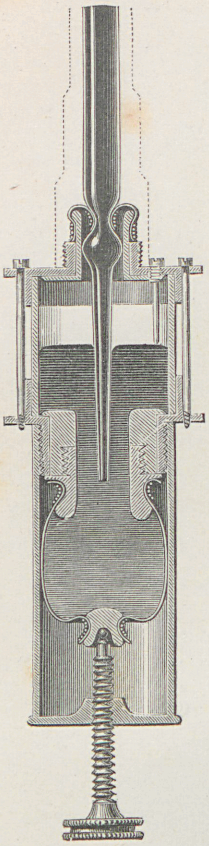


Fig. 75. — Cubeta del barómetro de Fortin.

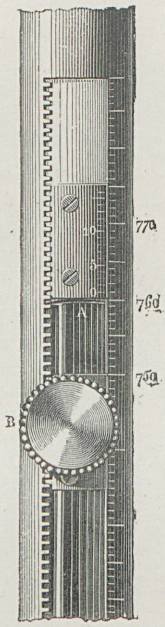


Fig. 76. — Vernier del barómetro de Fortin

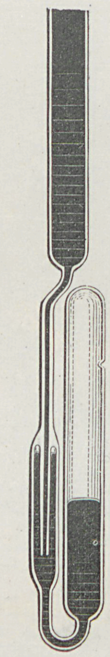


Fig. 77.—Barómetro de Gay-Lussac, modificado por Bunten.

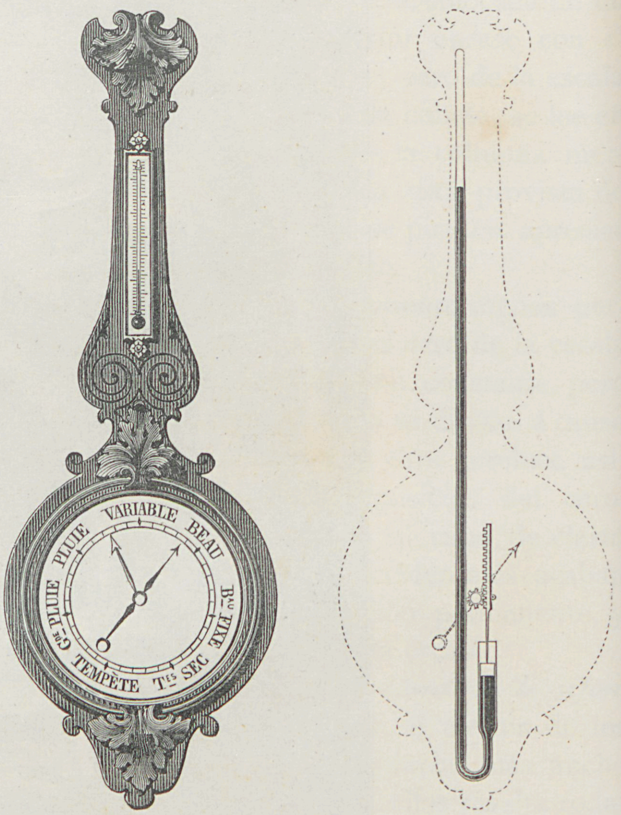


Fig. 78.—Barómetro de cuadrante.—Vista exterior y mecanismo interior

corta da paso al aire sobre el nivel inferior. Para anotar la altura barométrica, se mide con una escala dividida en milímetros la altura del nivel superior y se resta de ella la del inferior; la diferencia es la presion buscada. Como los tubos son del mismo diámetro, Gay-Lussac juzgó que seria inútil corregir la influencia de la capilaridad; por desgracia se ha reconocido que esta influencia no era la misma en el vacío barométrico y en el tubo inferior puesto en contacto del aire. Semejante circunstancia es enojosa: el instrumento se trasporta fácilmente, es poco voluminoso, y el aire penetra con dificultad en la cámara barométrica, á causa del reducido diámetro del tubo intermedio. En viaje, se le vuelve de arriba abajo. La modificacion ideada por Bunten dificulta todavía más la introduccion del aire; si este penetra á lo largo de las paredes del tubo, sus burbujas se detienen en un espacio estrecho dejado á propósito en la parte abultada del tubo capilar y no ejercen accion alguna en el nivel del mercurio.

Tal vez se desee saber cómo pueden hacerse sentir las variaciones de la presion atmosférica en una aguja móvil puesta sobre un cuadrante con divisiones. El *barómetro de cuadrante* no es de gran valer científico, porque rara vez está construido con suficiente precision; haciéndose uso de él en las habitaciones como objeto de adorno. Se compone de un tubo de sifon (figura 78), en cuyo brazo abierto penetra un flotador de marfil. Este flotador sube y baja haciendo dar vueltas, mediante una hebra de seda ó una barrita dentada, á una polea á cuyo eje está unida la aguja. Esta gira á un lado ó á otro, segun que el nivel sube ó baja. El cuadrante ó

esfera está dividido por comparacion con un termómetro fijo.

Hace algunos años que se han sustituido ventajosamente estos instrumentos con los barómetros metálicos ó *aneroides*.

Están basados estos últimos en la elasticidad de los metales enroscados en láminas muy delgadas. Consisten en un tubo aplanado de laton, de seccion elíptica, purgado de aire, herméticamente cerrado, encorvado en forma de arco de círculo y fijo en su punto medio, de suerte que los extremos libres de las dos mitades del tubo pueden oscilar á uno y otro lado del punto fijo (fig. 79).

Cuando la presion barométrica aumenta, el tubo se aplana más, crece la curvatura de los arcos y sus extremos libres se acercan; lo contrario sucede si la presion disminuye. Los extremos libres del tubo se articulan con unas palancas que ponen en movimiento la varilla de un sector de engranaje. La aguja del cuadrante, engranada á su vez en el sector por medio de un piñon, se mueve á uno ú otro lado, y recorre de este modo las divisiones del cuadrante, reguladas de antemano por comparacion con un barómetro fijo.

En el barómetro aneroide representado en la figura 80, ejércese la presion en la base estriada de un tambor en cuyo interior se hace el vacío. Cuando la presion aumenta, esta base se deprime, y por el contrario, se levanta si la presion disminuye, trasmitiéndose sus movimientos á la aguja por medio de un mecanismo particular del que dará una idea la figura 81. M. Vidi

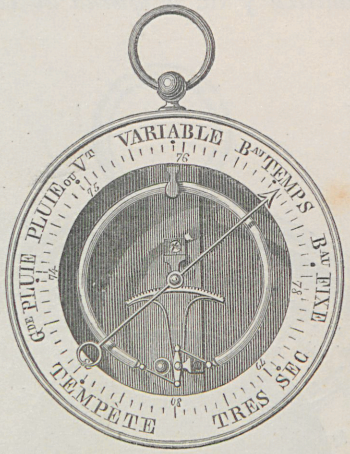


Fig. 79.—Barómetro aneroide de Bourdon

es el inventor de este barómetro que ha sido perfeccionado recientemente por el óptico inglés M. Cooke.

Estos barómetros son preferibles con mucho á los de cuadrante, si bien se ha reconocido la necesidad que hay de corregir de vez en cuando su gradacion, á causa de las variaciones que sufre el estado molecular del tubo en el barómetro Bourdon, ó el de la caja metálica y del muelle antagonista que lleva el de M. Vidi.

CAPITULO VIII

GRAVEDAD DEL AIRE Y DE LOS GASES

I

LA MÁQUINA NEUMÁTICA. — MÁQUINA NEUMÁTICA ORDINARIA. — MÁQUINA BIANCHI DE UN SOLO CUERPO DE BOMBA.

Segun hemos visto anteriormente, el descubrimiento de la gravedad ó peso del aire y de la presion atmosférica data tan sólo de poco más de dos siglos. Pero la aplicacion del principio se habia anticipado á la teoría, con mucha anterioridad á los trabajos de Galileo y Torricelli, y así lo prueba el relato mismo que hemos hecho y que nos ha trasmitido la historia. La presion del aire es en efecto la causa del movimiento ascensional del agua en las bombas, atribuyéndose generalmente la invencion de estos utilísimos aparatos á Ctesibio, geómetra y mecánico célebre que vivia en Alejandría 130 años ántes de Jesucristo, ó sea un siglo casi despues de Arquímedes.

Aplazaremos naturalmente la descripcion de las distintas clases de bombas usadas en las artes industriales para cuando nos ocupemos en especial de las aplicaciones de la gravedad; sin embargo, no podemos dispensarnos de describir aquí dos clases de bombas que son de uso constante en las investigaciones científicas, una de ellas destinada á hacer el vacío en un

recipiente lleno de aire ó de cualquier otro gas, ó cuando ménos á enrarecerlo; y la otra, por el contrario, usada para condensar ó comprimir un gas en un espacio cerrado. Estas bombas especiales se conocen con los nombres de *máquina neumática* y de *máquina de compresion.*

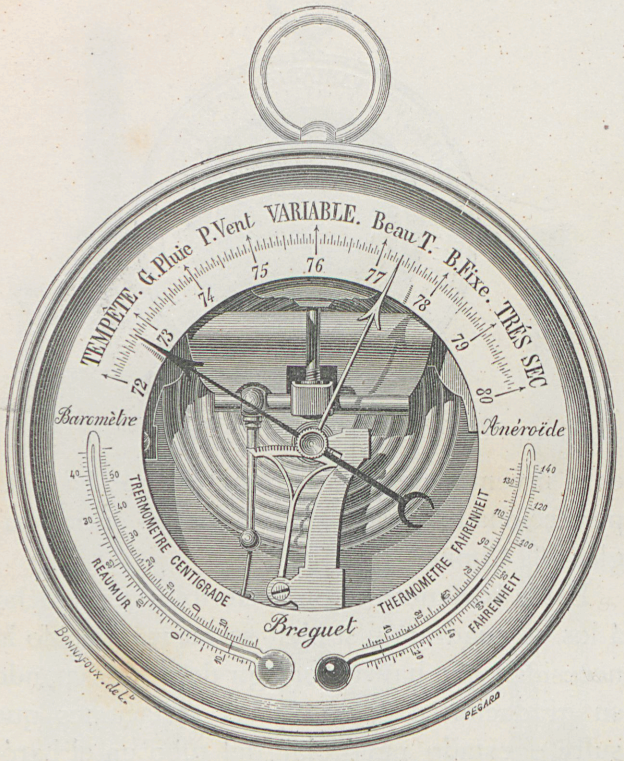


Fig. 80.—Barómetro aneroide de Vidi

El experimento del tubo de Torricelli proporcionaba un medio muy sencillo de hacer el vacío todo lo más perfecto posible: pues tal es el espacio situado sobre la columna de mercurio, y al cual se da el nombre de *cámara barométrica.* Pero si el medio es sencillo, dista mucho de ser práctico, toda vez que requeriria una enorme cantidad de mercurio cuando la capacidad que se quisiera enrarecer fuese algo grande, y porque á cada operacion habria que tomar precauciones muy molestas. Así es que de mucho tiempo atrás se ha recurrido á otros medios.

Otto de Guericke ideó y construyó en 1654 la primera máquina neumática. Ya hemos tenido ocasion de citar muchos experimentos curiosos debidos á tan ingenioso observador. Boyle, Papin, Muschenbroeck, 'S Gravesande y otros introdujeron poco despues importantes perfeccionamientos en dicha máquina, que en un principio sólo tenia un cuerpo de bomba, pero en breve se reconoció la necesidad de añadirle otro para anular la gran resistencia que se experimentaba al manejarla.

Hé aquí las principales disposiciones de la máquina actual.

Supongamos dos cuerpos de bomba, provistos en su base de una válvula que se abre de abajo arriba, y de un émbolo atravesado por una válvula que se abre como la anterior. Los dos orificios inferiores están en comunicacion por un conducto comun á ambos con una placa perfectamente lisa sobre la cual se coloca el recipiente y á la cual va á parar la abertura del conducto susodicho. La figura 82 representa la seccion longitudinal de uno de los cuerpos de bomba con sus dos válvulas y el conducto de comunicacion. Una vez comprendido bien el juego de esta mitad del aparato, será fácil comprender cómo funciona el conjunto.

Partamos desde el momento en que el émbolo toca la base inferior del cuerpo de bomba. El recipiente está lleno de aire á la presion atmosférica. Al levantar el émbolo se hace el vacío en la parte inferior del cuerpo de bomba: el aire del recipiente que llena el conducto ó canal de comunicacion levanta por efecto de su fuerza elástica la válvula inferior *a* (fig. 83), y se esparce en seguida por el vacío así formado. Miéntras tanto la válvula *b* del émbolo, permanece cerrada en virtud de la presion del aire que se ejerce exteriormente sobre toda la superficie del émbolo. El aire del recipiente sigue pasando desde éste al cuerpo de bomba hasta que el émbolo ha llegado á su mayor altura. Claro está que en este momento la cantidad de aire contenida en el recipiente ha disminuido, y que esta disminucion ha sido de *una mitad,* si el volúmen del cuerpo de bomba es precisamente igual al del recipiente.

Hagamos ahora recorrer al émbolo un camino inverso. En el momento en que empieza á bajar, la capacidad del cuerpo de bomba disminuye, la presion del aire contenido en él aumenta, sobrepuja á la del aire del recipiente, y la válvula inferior se cierra. Entonces, á medida que el descenso del émbolo reduce la capacidad inferior, aumenta la densidad del aire contenido en ella: en nuestra hipótesis, esta densidad volverá á ser igual á la del aire atmosférico tan luego como el émbolo llegue á

la mitad de su carrera. Al bajar éste más, la presion interior aumenta, levanta la válvula del émbolo (fig. 82), y el aire se escapa en su totalidad á la atmósfera no bien toca el émbolo de nuevo el fondo del cilindro.

Este único movimiento de subida y de bajada, analizado en sus efectos como acabamos de hacerlo, explica toda la serie de la operacion, puesto que ha bastado para enrarecer en su mitad el aire contenido en el recipiente. Un

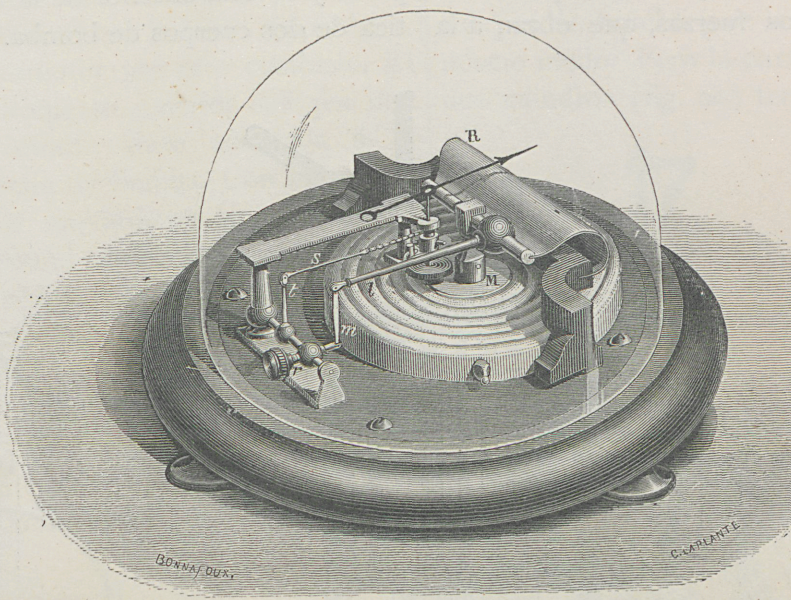


Fig. 81.—Mecanismo del barómetro de Vidi
M, caja en cuyo interior se ha hecho el vacío; R, muelle al cual se comunican los movimientos de oscilacion de la caja; *l*, *m*, *r*, *t*, sistema de palancas articuladas que trasmiten el movimiento á una cadenilla *s*; *s*, cadenilla que se enrosca en el eje de la aguja indicadora del barómetro

segundo golpe de émbolo, luego un tercero, enrarecerán de nuevo y en la misma proporcion el aire restante, cuya presion se irá reduciendo á la cuarta, la octava, la décimasexta parte de la presion primitiva, conforme lo veremos muy en breve al demostrar la ley de Mariotte. Es evidente que la progresion cambiará si cambiase tambien la relacion entre la capacidad del cilindro y la del recipiente.

Las figuras 83 á 86 nos explicarán ahora la disposicion real de la máquina, demostrándonos cuál es la utilidad del segundo cuerpo de bomba. En la primera de dichas figuras se vé cómo están colocadas las dos válvulas, esto es, la del émbolo y la de la parte inferior del cuerpo de bomba. La válvula del émbolo es una plaquita *b*, comprimida sobre la abertura por un muelle flojo en espiral y que cede á una débil presion en sentido inverso. La válvula *a* del cuerpo de bomba es cónica: un vástago de hierro que corre suavemente por el émbolo la levanta ó la baja, pero á corta distancia. La figura 84 demuestra que las barras de los émbolos son dos cremalleras que engranan con una rueda dentada, de suerte que por medio de un manubrio de dos brazos, se baja un émbolo cuando se sube el otro. Gracias á

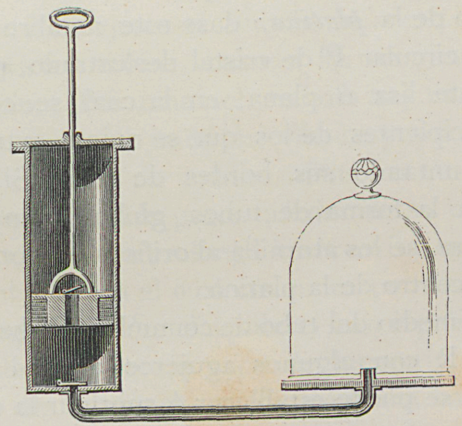


Fig. 82.—Juego del émbolo y de las válvulas en la máquina neumática (movimiento descendente)

esta disposicion, se hace doble trabajo con una sola maniobra, y por consiguiente, la operacion durará para un mismo grado de vacío la mitad ménos que si sólo hubiese un cuerpo de bomba, y sobre todo la resistencia queda reducida á su menor expresion, que era el principal objeto

que se propusieron los reformadores de la primitiva máquina, pues á medida que se hace el vacío, aunque cada émbolo tenga que soportar la presion atmosférica que se ejerce sobre su base, esta misma presion ayuda al otro émbolo á bajar. De este modo hay una compensacion ó equilibrio entre dos fuerzas, que obran á la verdad en el mismo sentido, pero cuya resultante se aplica al eje del manubrio, resultante que se encuentra contrabalanceada ó vencida por la resistencia de la máquina, sin fatigar al operador. Las figuras 85 y 86 representan el plano y la vista exterior de la máquina neumática de dos cuerpos de bomba.

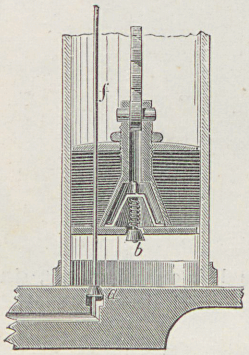


Fig. 83.—Detalle del émbolo y de las válvulas (movimiento ascendente)

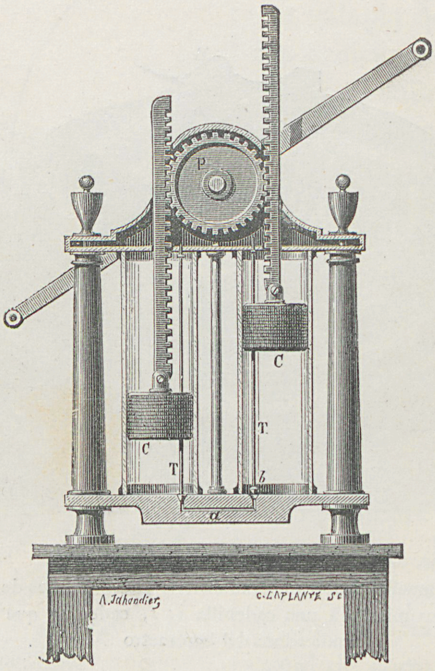


Fig. 84.—Maquina neumática de dos cuerpos de bomba Seccion trasversal

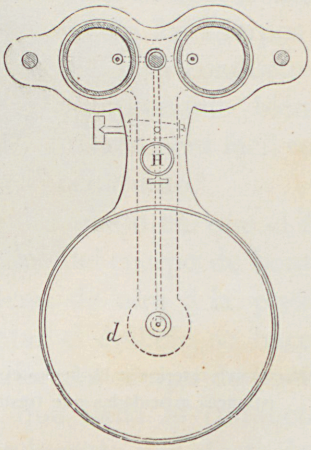


Fig. 85.—Plano de la máquina neumática de dos cuerpos de bomba

En ellas se ve cómo comunica el conducto que reune los dos cuerpos de bomba con el centro de la *platina:* dase este nombre á una placa circular P de cristal deslustrado, perfectamente lisa ó plana, en la cual se colocan los recipientes de los que se quiere extraer el aire, untando sus bordes de sebo. Si estos tienen la forma de tubos, globos, campanas, etcétera, se los atornilla al orificio del conducto en el centro de la platina.

En medio del tubo de comunicacion hay una llave R con algunos agujeros merced á los cuales se puede establecer ó suprimir la comunicacion entre la máquina y el recipiente, ó bien hacer que el aire exterior penetre en los cuerpos de bomba ó tan sólo en la campana.

En el trayecto del mismo conducto se ve un pequeño recipiente fijo H que contiene un tubo barométrico ó manómetro, el cual sirve para indicar el grado de vacío obtenido bajo la campana, es decir, cuál es la presion de la escasa cantidad de aire que áun contiene esta última.

Finalmente, las buenas máquinas están provistas de un aparato inventado por M. Babinet. Este aparato consiste en una llave por medio de la cual, y por un conducto particular, se puede hacer que el recipiente no comunique más que con un solo cuerpo de bomba. El aire que queda todavía en aquel despues de funcionar algun tiempo la máquina, va á parar de rechazo por otro conducto bajo el émbolo del segundo cuerpo de bomba, y allí, gracias al aumento de presion que resulta de este rechazo, acaba por levantar la válvula. De este modo se lleva el grado de vacío á un límite tal, que el manómetro apenas marca la presion del aire que todavía queda en el recipiente.

La máquina neumática de Bianchi no tiene más que un cuerpo de bomba, pero el émbolo divide el cilindro en dos compartimientos que alternativamente reciben y expulsan el aire. La figura 88 da á entender cómo funciona esta bomba. Una misma varilla soporta las dos válvulas cónicas movibles que se cierran ó abren

alternativamente segun el juego del émbolo, abriendo ó cerrando así la comunicacion de cada compartimiento con el recipiente. El aire del compartimiento inferior, comprimido cuando baja el émbolo, levanta una válvula mantenida por un resorte de hélice en el orificio de un conducto practicado en la barra del émbolo, y se escapa al exterior por este conducto. El aire del compartimiento superior sale por una válvula de la misma clase adaptada á la cubierta del cuerpo de bomba. Con un manubrio se pone en movimiento un sistema de engranaje, y como el cuerpo de bomba puede oscilar en un plano vertical, el movimiento alternado del émbolo obedece á otro continuo de rotacion, cuya velocidad está regulada por un volante muy pesado (fig. 87). Con esta máquina se puede hacer rápidamente el vacío en recipientes cuya capacidad crece con las dimensiones del cuerpo de bomba.

II

NUEVAS MÁQUINAS NEUMÁTICAS.—BOMBA DE MERCURIO

¿Es posible hacer el vacío absoluto en un recipiente cualquiera con las máquinas que acabamos de describir? Ciertamente que no; el cálculo y hasta un sencillo raciocinio prueban que el grado de vacío es forzosamente limitado, puesto que cada golpe de émbolo tan sólo expulsa una fraccion del aire ó del gas que queda en el recipiente; lo cual se expresa diciendo que para conseguir un vacío perfecto el número de golpes de émbolo deberia ser *infinito*.

Aparte de esto, es menester contar con las imperfecciones de la máquina, por cuidadosamente construida que esté. Entre los émbolos y los cilindros, en las válvulas, en todas las junturas, hay forzosamente resquicios, imperceptibles sin duda, pero que bastan para dar paso al aire exterior. En suma, una buena máquina puede hacer el vacío hasta 1 ó 2 milímetros de diferencia; es una fraccion de atmósfera bastante notable todavía, lo ménos de un milésimo. Pero al hacer experimentos de física ó de fisiología, se necesita á veces obtener un vacío más perfecto, lo que se ha conseguido en estos últimos años con ciertos aparatos en que la comunicacion del recipiente con el aire exterior queda completamente obstruida mediante una capa líquida poco evaporable de mercurio.

Describamos dos de estas máquinas.

Una de ellas, que es la de M. Kravogl, está representada en la fig. 89. Su disposicion general es la de una máquina ordinaria de dos cuerpos de bomba y se la hace funcionar del mismo modo. Pero la parte superior A de los dos cilindros (fig. 90) termina en un cono en

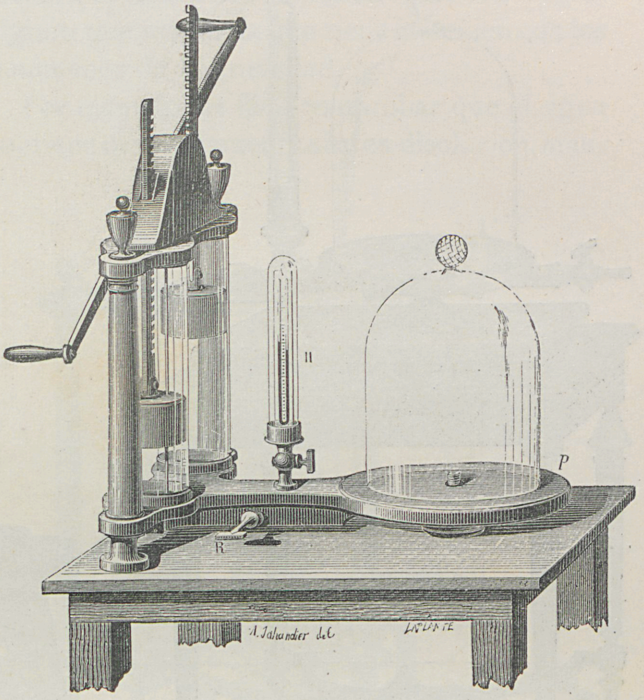


Fig. 86.—Vista exterior de la máquina neumática

que va á encajarse el émbolo de acero C, que es cónico tambien, cuando ha terminado su ascension. Por cima del émbolo hay una capa de mercurio que baña su vértice y que sobresale de él cosa de medio milímetro cuando el émbolo está en la parte inferior de su carrera. Cada cilindro se prolonga hácia arriba en forma de embudo con el cual comunica por una parte estrangulada. Por ella sale el aire repelido por el émbolo ó por la capa de mercurio puesta sobre él. Al funcionar la máquina, muévese automáticamente una válvula *c*, la cual se levanta, dando salida al aire, mas al propio tiempo el mercurio penetra en el embudo, é impide la introduccion del aire exterior. Al empezar el movimiento descendente, la misma válvula *c* se levanta de nuevo, y deja caer el mercurio, pero quedando siempre debajo de ella una parte de dicho líquido.

Vése á la derecha, en *i*, la válvula por la

cual llega el aire del recipiente al cuerpo de bomba.

Segun M. Privat Deschanel, «si el mercurio de este aparato está bien seco, se puede hacer el vacío hasta $^{1}/_{10}$ de milímetro. El estado de sequedad del mercurio es condicion de suma importancia; porque á las temperaturas ordinarias la fuerza elástica del vapor de agua tiene un valor bastante apreciable. Cuando se quiere utilizar toda la potencia de enrarecimiento de la máquina, conviene poner entre la vasija de la cual se desea extraer el aire y el cuerpo de bomba un aparato desecador.»

La bomba de mercurio ó máquina neumá-

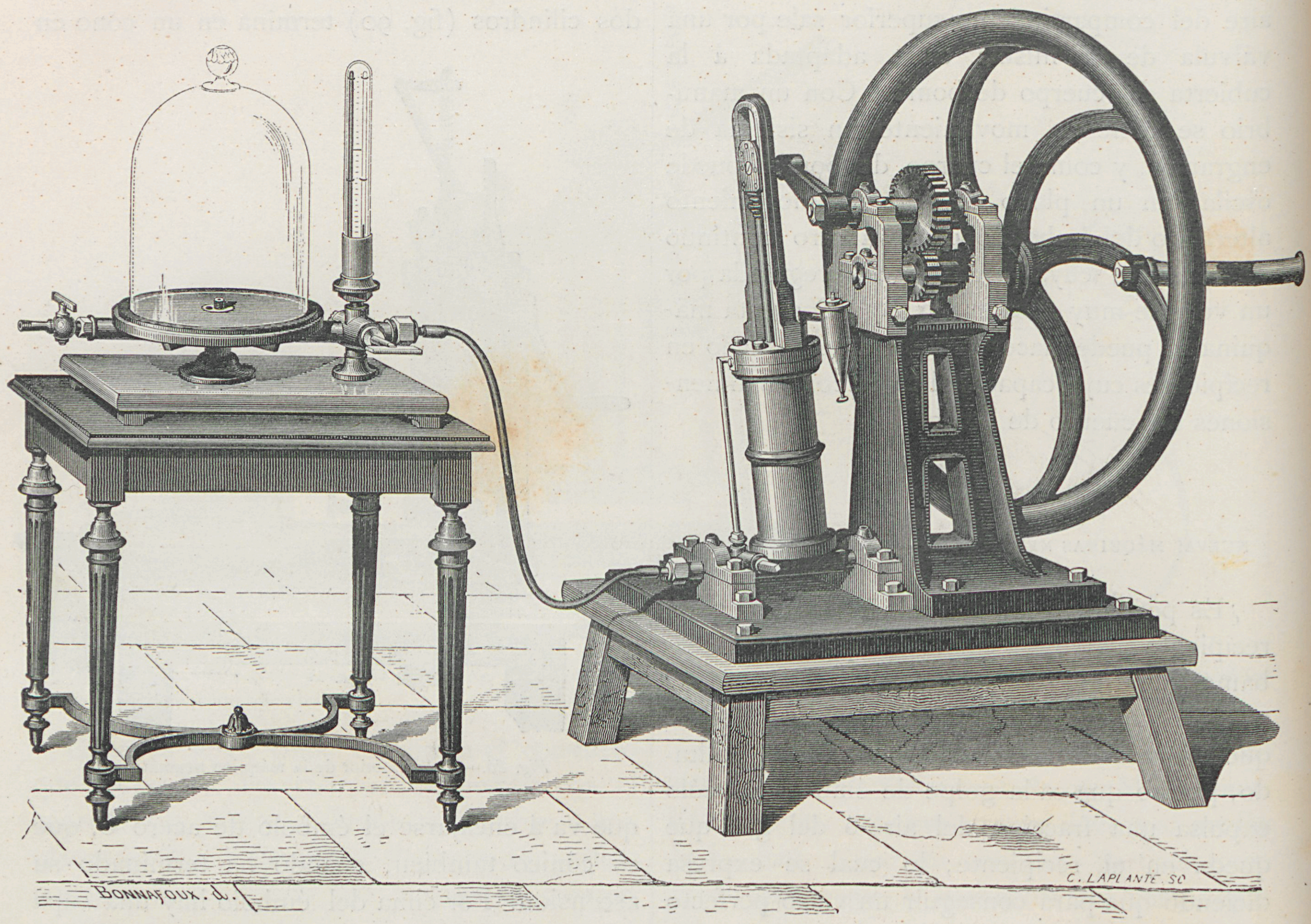


Fig. 87.—Máquina neumática de Bianchi

tica de M. Alvergniat, representada en la figura 91, fué ideada en principio por el eminente físico Victor Regnault; perfeccionada luego en un punto secundario, ha obtenido el mayor grado posible de precision gracias á los esfuerzos del constructor cuyo nombre lleva.

Consiste en un tubo barométrico AB, terminado en su parte superior por un recipiente de cristal A y puesto en comunicacion por la inferior, mediante un tubo de goma, con otro recipiente C que hace las veces de cubeta, y cuya capacidad es un poco mayor que la del depósito A. El segundo recipiente puede correr á lo largo de una ranura practicada en la armazon del aparato, por medio de una cremallera, siendo fácil mantenerlo fijo á cualquier altura. Encima de A hay una cubeta de mercurio D, que comunica con el recipiente por un tubo al cual va adaptada una llave de tres conductos *r*. Véase cómo funciona la bomba de mercurio cuando se quiere hacer el vacío en un recipiente E.

Se sube el depósito C hasta el punto más alto de la ranura y se echa mercurio en él, despues de poner la llave *r* en la posicion núm. 1. El mercurio baja por el tubo, y en virtud del equilibrio de los vasos comunicantes, sube hasta el recipiente A llenándolo y llega hasta la cubeta.

Colócase entónces la llave en la posicion

número 2, y se baja el recipiente C hasta la parte inferior de la ranura. Como se corta la comunicacion, el mercurio queda en la cubierta D, pero el de A desciende hasta que la diferencia de nivel del mercurio en C y en el tubo sea

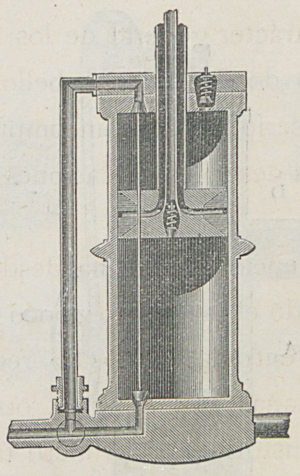


Fig. 88. — Máquina neumática de Bianchi: vista interior del cuerpo de bomba

igual á la presion atmosférica. Se ha hecho, pues, el vacío barométrico en A, y esta es la posicion indicada en la figura 91.

Si se da entónces vuelta á la llave poniéndola en la tercera posicion, la campana, que no está figurada aquí, pero á la cual va á parar el tubo E, comunica con A; el gas ó el aire que aquella contiene se difunde en este depósito, y se obtiene un vacío parcial. Así queda terminado el primer período de la operacion, análogo al movimiento de un golpe de émbolo, y haciendo una serie de maniobras semejantes, se obtendrá el grado de vacío apetecido.

Con la máquina Alvergniat se llega á producir un vacío hasta $^1/_{10}$ de milímetro. Pero como la manipulacion es larga y penosa, no se hace uso de aquella sino para extraer el aire de espacios muy reducidos, ó si se trata de espacios más considerables, para terminar el trabajo empezado con las máquinas neumáticas ordinarias.

Al hacer M. Crookes sus curiosos experimentos sobre los fenómenos que se presentan en los gases enrarecidos, ha añadido á este aparato ciertas disposiciones especiales y logrado así obtener en un globo de trece centímetros un vacío hasta de una millonésima de atmósfera, esto es, ménos de un milésimo de milímetro de mercurio.

III

VARIOS EXPERIMENTOS QUE SE EFECTÚAN CON LA MÁQUINA NEUMÁTICA

Hemos tenido muchas veces ocasion de describir algunos curiosos experimentos hechos con la máquina neumática, y más adelante habremos de ocuparnos de otros relativos á los fenómenos del calor, del sonido y de la electricidad. Por ahora nos contentaremos con indicar alguno que otro más que tiene conexion con los fenómenos de la gravedad.

Por ejemplo, es fácil comprobar que el agua contiene ordinariamente aire en disolucion, man-

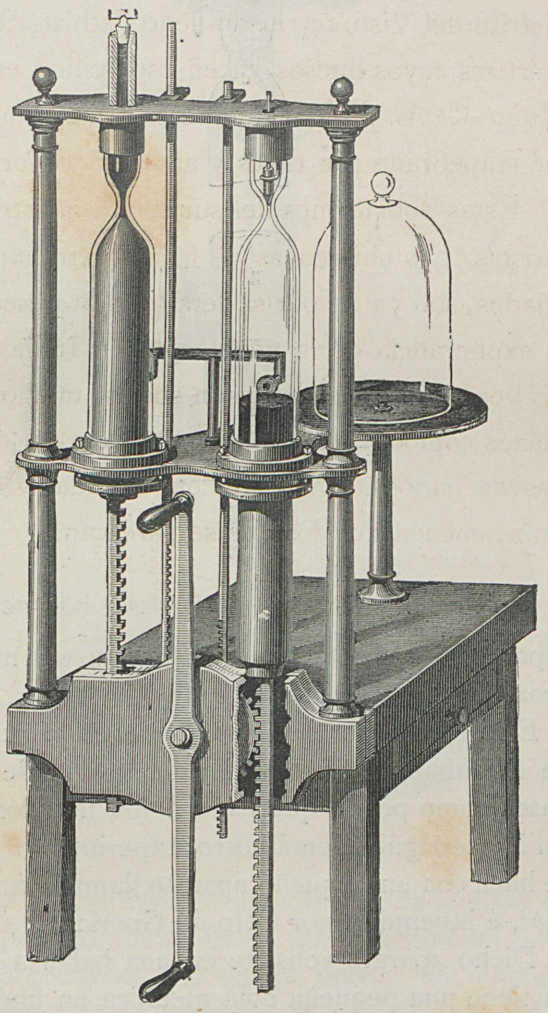


Fig. 89. — Máquina neumática de Kravogl

tenido en ella por efecto de la presion atmosférica. Si se pone bajo el recipiente de la máquina neumática un vaso lleno de agua que no haya hervido, vese cómo se escapan del líquido muchas burbujillas de aire, miéntras otras, adheridas á las paredes del vaso, aumentan poco á poco de volúmen á medida que la presion dis-

minuye, se desprenden de aquellas y suben á la superficie del agua. Si se han echado en esta cuerpos sólidos, como fragmentos de cristal, de madera ó de metal, ó granos de arena, etc., ocurre el mismo fenómeno en la superficie de cada uno de ellos, lo que prueba que todos los cuerpos tienen la propiedad de retener adherente á su superficie cierta cantidad de aire que la presion atmosférica mantiene fija en ella. El humo, que se remonta á la atmósfera sobre las

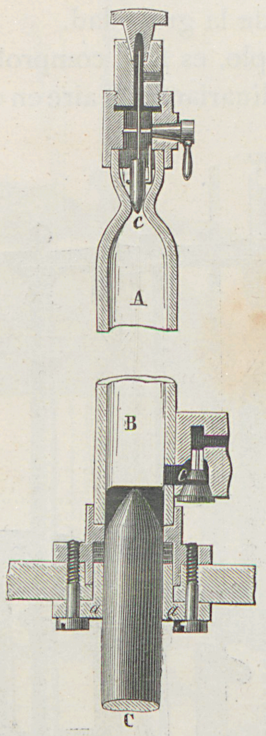


Fig. 90.—Detalles de un émbolo de la máquina de Kravogl

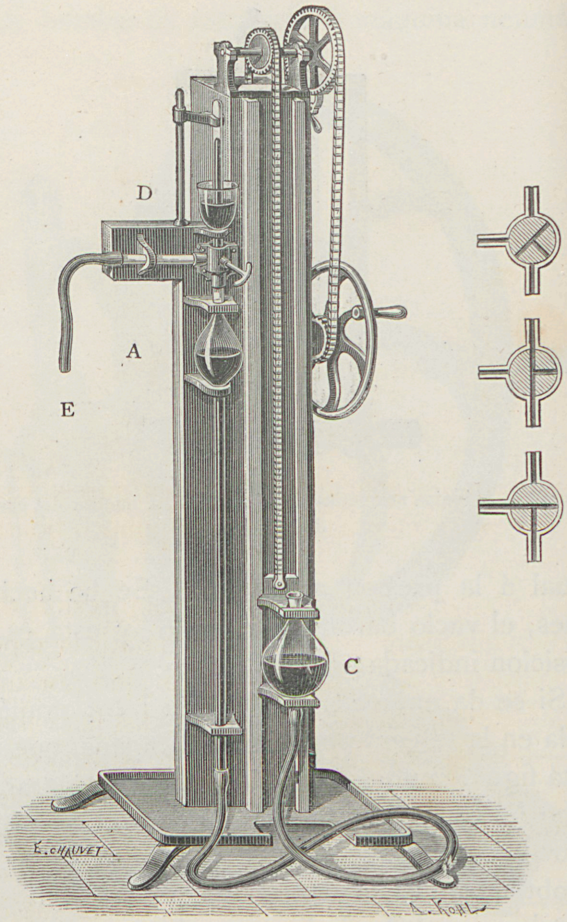


Fig. 91.—Máquina Alvergniat ó bomba de mercurio

capas inferiores, cae en el vacío como una masa pesada.

Este fenómeno demuestra que el principio de Arquímedes es tan cierto respecto de los gases como por lo que hace á los líquidos, y así lo atestigua además otro experimento que se hace con un pequeño aparato llamado *baróscopo*, é inventado por Otto de Guericke.

Dicho aparato consiste en una balanza que sostiene una pequeña bola metálica en uno de sus extremos, y en el otro una esfera de metal tambien, hueca, de paredes delgadas y de volúmen mucho mayor que la bola; pesados en el aire, ambos cuerpos se equilibran exactamente (fig. 92). Cuando se pone este aparato bajo el recipiente de la máquina neumática, empieza á perturbarse el equilibrio á medida que se va haciendo el vacío, y la balanza se inclina hácia la esfera más voluminosa. Por consiguiente, esta esfera perdia en el aire cierta parte de su peso, que segun se sabe es precisamente igual al del aire desalojado por ella. Esto nos prueba que para conocer el peso exacto de los cuerpos, es menester pesarlos en el vacío, ó á lo ménos tener en cuenta el error ocasionado por el empuje del aire; así es que cuando se quieren hacer pesadas rigurosamente exactas en química, ó determinar con precision las densidades de los cuerpos, es de todo punto indispensable esta correccion.

La aplicacion del principio de Arquímedes á los globos aerostáticos será objeto de una descripcion ulterior. Tambien dejaremos para el mismo capítulo la descripcion de las aplicaciones de la máquina neumática á varios usos industriales.

IV

MÁQUINA PARA COMPRIMIR LOS GASES Ó BOMBA DE COMPRESION

En lugar de hacer el vacío en una vasija ó recipiente, se puede, por el contrario, acumular,

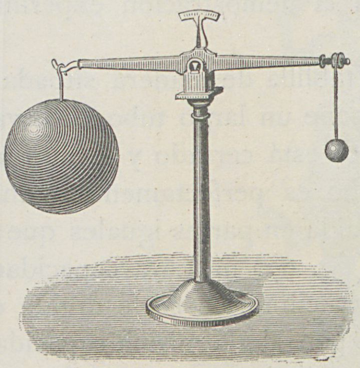


Fig. 92.—El baróscopo

comprimir en ella el aire ú otros gases. Esta operacion se efectúa con la máquina ó bomba de compresion.

Constrúyense máquinas de compresion absolutamente semejantes á las neumáticas, ó por lo ménos que no difieren de ellas sino por una modificacion, cual es la de que todas las válvulas están ó se abren en direccion contraria. Examinando la figura 93, que representa la seccion vertical de una bomba de compresion, se verá inmediatamente cuál es el juego del mecanismo, y se comprenderá que el movimiento de subida y bajada del émbolo, en lugar de enrarecer ó de expulsar el aire, debe, por el contrario, acumularlo y comprimirlo.

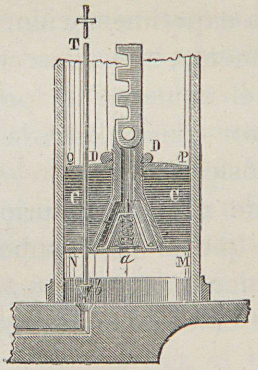


Fig. 93.—Máquina de compresion: seccion de uno de los cuerpos de bomba y del émbolo

La válvula *b* abre ó cierra la comunicacion entre el recipiente y el cuerpo de bomba; la válvula *a* efectúa las mismas funciones entre este último y el aire exterior. Ambas se abren de arriba abajo. Supongamos que el émbolo está en el punto culminante de su carrera, y todo el aparato lleno de aire á la presion atmosférica. Al hundir el émbolo, el aire del cuerpo de bomba se comprime, su tension aumenta, cierra la válvula *a* y abre la *b*, rechazando el aire al conducto que comunica con el recipiente y hasta al recipiente mismo. Al levantar el émbolo, se hace el vacío bajo él; el aire ya comprimido del recipiente cierra la válvula *b*, el aire exterior abre la *a* y acaba por llenar el cuerpo de bomba. Bajando de nuevo el émbolo, se le rechazará al recipiente, y así sucesivamente.

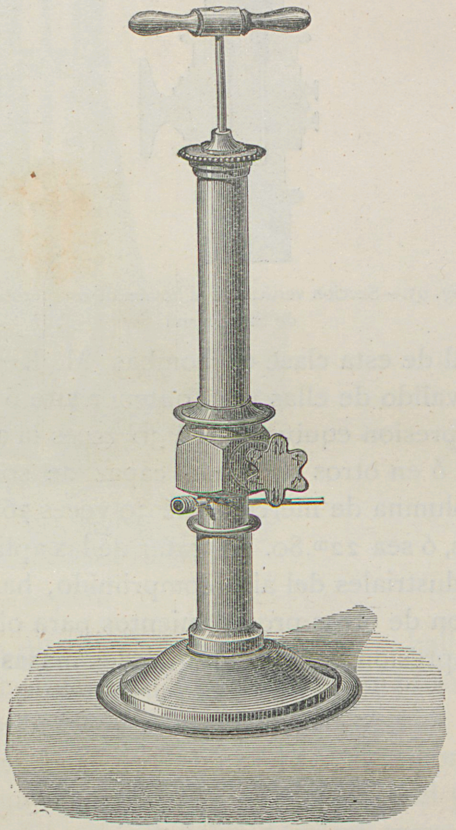


Fig. 94.—Bomba de compresion de Silbermann

La compresion efectuada por cada clase de máquinas tiene un límite que depende del *espacio perjudicial* que queda debajo del émbolo cuando éste ha llegado á la parte inferior de su carrera. Cuando la compresion realizada es tal que el aire del cuerpo de bomba reducido á este espacio tiene ménos tension que el aire comprimido, el juego de la válvula *b* es ya imposible.

Hoy se hace uso con preferencia de máquinas de compresion de un solo cuerpo, de émbolo macizo, y cuyas válvulas están situadas en el fondo del cilindro, una de ellas en comunicacion

con el aire exterior y la otra con el recipiente (1) (figs. 94 y 95). Si se trata de comprimir un gas que no sea el aire, la primera válvula comunica con la vasija que contiene el gas que se ha de comprimir. Si se desea una compresion más rápida, se hace uso de bombas acopladas. La figura 96 representa la disposicion

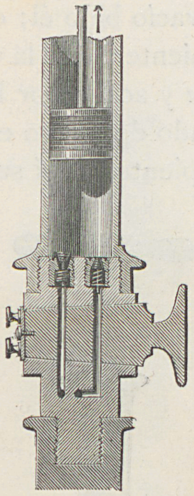


Fig. 95.—Seccion vertical de la bomba de compresion de Silbermann

general de esta clase de bombas. M. Regnault se ha valido de ellas para obtener aire ó vapor á una presion equivalente á 30 veces la atmosférica, ó en otros términos, capaz de soportar una columna de mercurio de 30 veces 76 centímetros, ó sea 22m,80. Al tratar de las aplicaciones industriales del aire comprimido, haremos mencion de otros procedimientos para obtener la compresion del aire en grandes masas.

V

LEY DE MARIOTTE

Digamos ahora en qué principio se basan los físicos para valuar las presiones de los gases, y qué ley siguen las variaciones de estas presiones, en virtud de la sola influencia del cambio de volúmen.

(1) La bomba de compresion de esta clase, cuya vista exterior y seccion vertical representamos en las figuras anteriores, ha sido inventada por M. J. Silbermann, preparador de la asignatura de Física en el Colegio de Francia. Si contáramos con el espacio suficiente, diríamos cómo se puede comprimir en un recipiente el aire ó cualquier gas contenido en otro, merced á la llave cuya posicion se ve debajo de las válvulas, invertir el órden de comunicacion de los recipientes, restablecer entre ellos el equilibrio de presion, y por último hacer que comunique cada uno de ellos con la atmósfera. Por consiguiente, puede servir como se quiera de máquina neumática ó de máquina de compresion.

Esta ley, descubierta por los físicos Mariotte y Boyle (2), se enuncia del modo siguiente: *Si se somete una misma masa gaseosa á una serie de presiones diferentes, los volúmenes que sucesivamente ocupa varían en razon inversa de las presiones ejercidas.*

Hé aquí la demostracion experimental de esta ley:

En una tablilla de madera situada verticalmente se pone un largo tubo encorvado cuyo brazo menor está cerrado y el mayor abierto. Si este tubo es perfectamente cilíndrico, la escala dividida en partes iguales que se ve en la tablilla (fig. 97) indicará capacidades iguales; si no es cilíndrico se le divide en partes desiguales, pero de la misma capacidad. Introduzcamos en él cierta cantidad de mercurio, y mediante algunas ligeras sacudidas, hagamos de modo que el líquido se reparta en dos columnas de la misma altura cuyos niveles correspondan á los ceros de las dos escalas. En este momento hay equilibrio entre el aire exterior que comprime el mercurio, de la rama mayor abierta, y el aire interior contenido en la rama cerrada, y por consiguiente la presion de este último es de una atmósfera.

Si echamos ahora mercurio en el brazo mayor, quedará roto el equilibrio, y el líquido subirá en el brazo menor. Detengámonos en el momento en que el nivel llegue á la division 12, es decir, en que el volúmen del gas haya quedado reducido á la mitad, y notaremos que la diferencia de los niveles del mercurio es precisamente igual á la altura barométrica en el momento de la experimentacion; luego es claro que en tal momento, esta diferencia de nivel es la que indica el aumento de presion del gas encerrado, y por consiguiente la presion total es de dos atmósferas.

Vertiendo de nuevo mercurio en la rama mayor, veráse que el nivel sube en la menor hasta las divisiones 16, 18, 19,2 por ejemplo, lo que supone el volúmen del gas reducido al

(2) En Inglaterra se llama *ley de Boyle* á la que se conoce en Francia con el nombre de Mariotte. En efecto, ambos físicos la descubrieron por la misma época. Al principio no se la aplicaba más que al aire atmosférico, como lo prueban los títulos de las obras en que se consignaron los experimentos sobre la fuerza elástica del aire y sobre sus grados corespondientes de condensacion. Dichos títulos son: R. Boyle, *Nova experimenta physico-mecanica de vi aeris elastica;* Mariotte, *De la nature de l'air.*

tercio, al cuarto, al quinto de su volúmen primitivo, y entónces se observará que las presiones son sucesivamente de 3, 4, 5 atmósferas. En términos generales, los volúmenes ocupados por el aire ó por cualquier otro gas varían precisamente en razon inversa de las presiones que este gas soporta; lo cual demuestra la ley enunciada.

Con la misma facilidad se comprueba esta ley cuando se somete la masa gaseosa á presio-

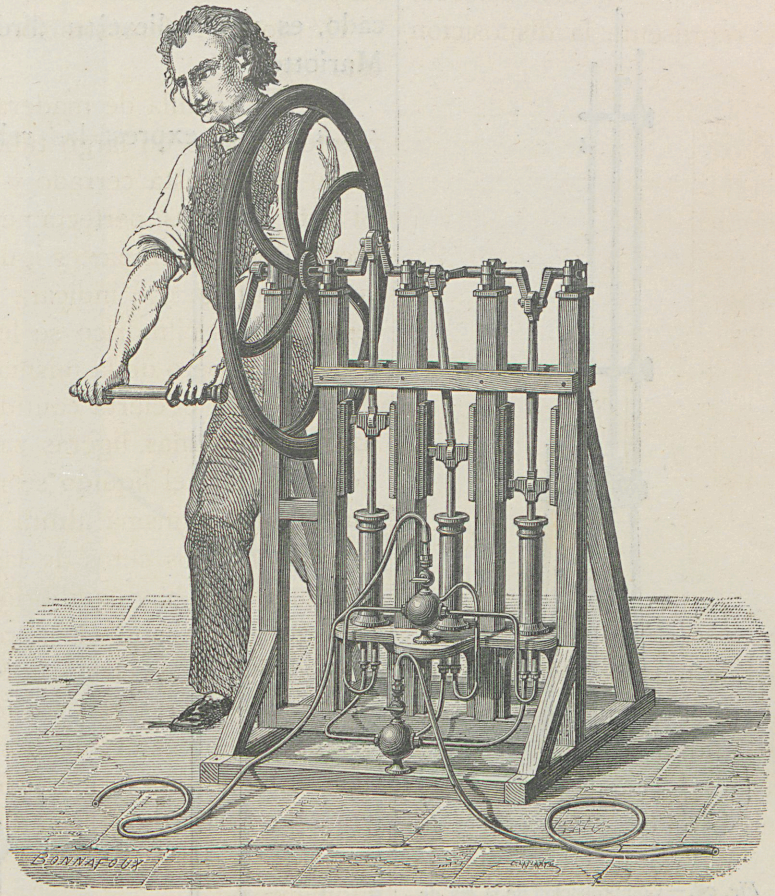


Fig. 96. — Bombas de compresion acopladas

nes decrecientes, inferiores á una atmósfera: los volúmenes aumentan como las presiones disminuyen. Esta comprobacion de la ley de Mariotte respecto de las presiones inferiores á la atmosférica se hace con el aparato representado en la figura 98. En una cubeta llena de mercurio se colocan dos tubos barométricos, el uno de ellos, inmóvil, marca por el nivel *a* del mercurio la presion de la atmósfera en el momento del experimento. El otro tubo es movible, y se puede sacar ó meter como se quiera en la prolongacion inferior de la cubeta. Antes de introducir el gas, el nivel del mercurio se eleva en este tubo á la misma altura que en el barómetro vecino. Pero si en el vacío se introduce cierta cantidad de gas, este nivel se deprime y baja á un punto *b*, de suerte que la diferencia de nivel *ab*, expresada en milímetros, mide la presion del gas. Levantando el tubo, el gas se dilata y la presion aumenta, hallándose que el producto del volúmen por la presion correspondiente es constante.

Para hacer esta comprobacion, importa mucho que el tubo en que se introduce el gas sea perfectamente cilíndrico, ó en el caso de que no se llene esta condicion, que á la division en milímetros que miden las presiones vaya unida una disminucion en partes de igual capacidad para medir los volúmenes.

Vese por esta ley, cuya importancia es muy grande, cuán compresibles son los gases y cuánto difieren por este concepto de los líquidos, cuya compresibilidad está contenida, segun hemos visto, en reducidísimos límites.

En los experimentos que preceden, se ha supuesto que la temperatura es constante, sobreentendiéndose además que el aire ó los otros gases han de estar bien secos.

Si la ley de Mariotte fuese rigurosamente cierta, resultaria de ella que todos los gases están dotados de igual compresibilidad, y que esta compresibilidad es creciente, cualesquiera que sean las presiones á que se los somete.

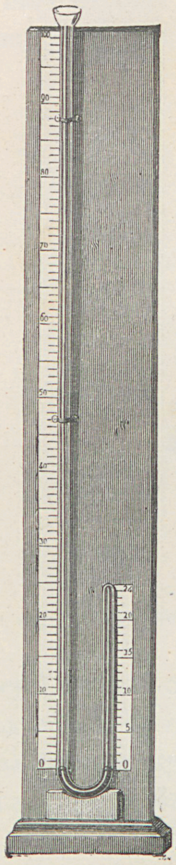


Fig. 97.— Comprobacion experimental de la ley de Mariotte.

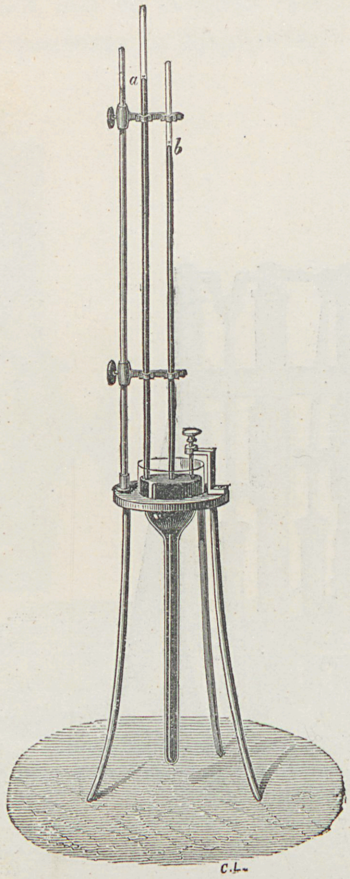


Fig. 98.—Comprobacion de la ley de Mariotte para las presiones decrecientes inferiores á la presion atmosférica.

Dulong y Arago han comprobado la exactitud de esta ley, en cuanto al aire, hasta 26 atmósferas; pero Despretz y posteriormente Regnault han averiguado que dicha compresibilidad no era exactamente la misma respecto de los demás gases, y además que varía un tanto en un mismo gas. El aire, el nitrógeno, el ácido carbónico se comprimen en realidad algo más de lo que exigiria la ley de Mariotte; pero el gas hidrógeno se separa de ella en sentido contrario. En cuanto á los gases susceptibles de pasar al estado líquido, la separacion á que nos referimos ha resultado tanto más considerable cuanto que los experimentos se han verificado á una temperatura más próxima á aquella en que dichos gases se licuan. Es probable que, al rededor de esta temperatura, sufran aquellos modificaciones moleculares cuya naturaleza se ignora todavía, pero que contrarian los efectos dimanados de las variaciones de presion.

La medida de la presion del aire que queda bajo del recipiente de la máquina neumática cuando se hace en él el vacío, medida que se efectúa con un *manómetro*, ó barómetro truncado, es una aplicacion directa de la ley de Mariotte.

La ley que expresa las relaciones entre los volúmenes de los gases y las presiones que soportan, ó lo que es lo mismo, entre su elasticidad y su compresibilidad, es demasiado importante para que pasemos en silencio los experimentos que desde Boyle y Mariotte han ido reduciendo los límites en que era aplicable.

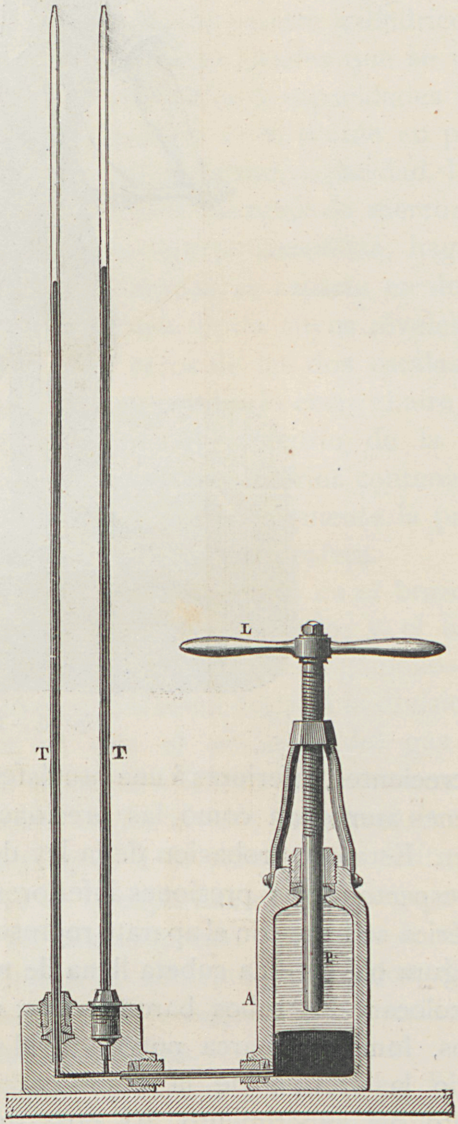


Fig. 99.—Aparato de Pouillet para demostrar la compresibilidad desigual de los gases

Reconocióse desde luégo que la ley de Mariotte no es exacta relativamente á todos los gases. Van Marum fué el primero que vió que la compresibilidad del gas amoniaco es mayor que la del aire; apénas quedaba este último reducido á la tercera parte de su volúmen cuando ya el otro pasaba al estado líquido, á la misma presion. Œrstedt y Wendsen obtuvieron en 1826 un resultado análogo: el gas ácido sulfuroso se comprime tanto más cuanto más

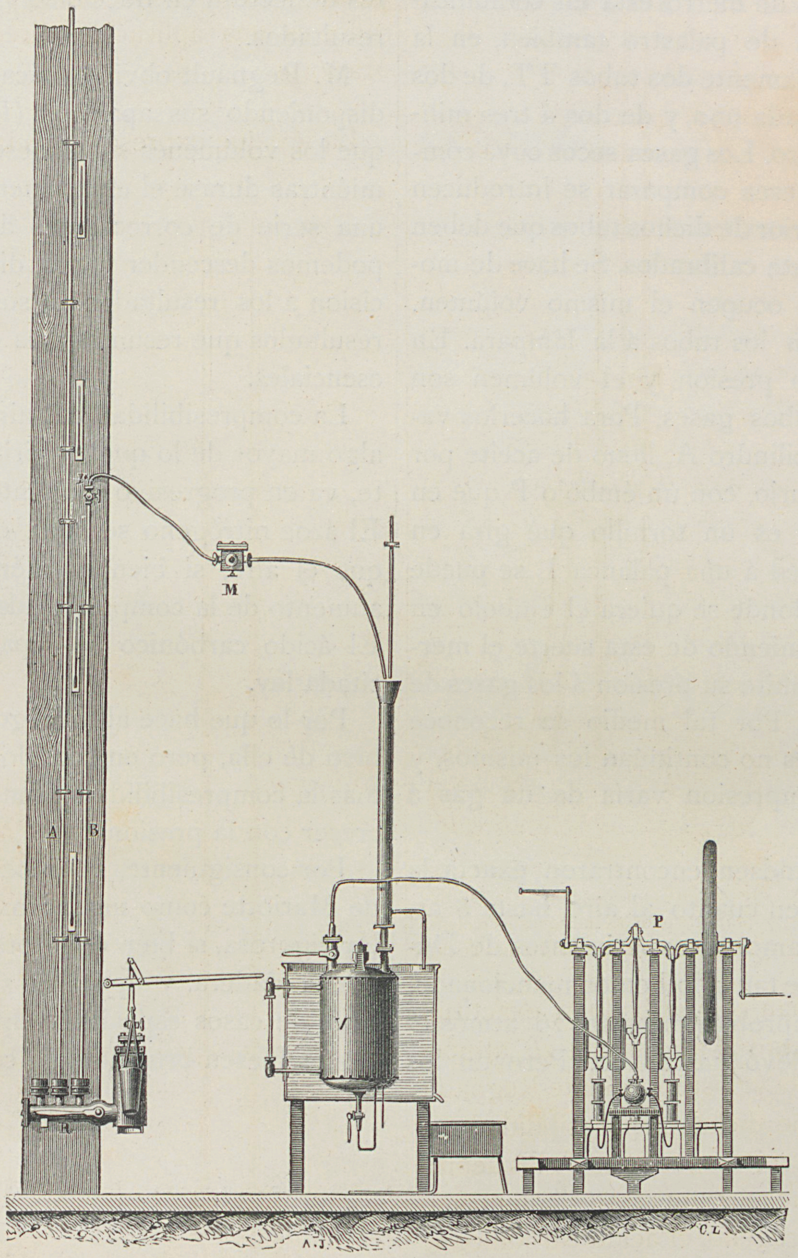


Fig. 100. —Aparato de M. Regnault para el estudio de la compresibilidad de los gases (1)

se acerca á su punto de liquefaccion. Despretz, y Pouillet despues, confirmaron estas observaciones, haciéndolas extensivas á otros gases. El

(1) A, B, tubos del manómetro que sirven para medir las presiones y los volúmenes del gas con el que se hace el experimento. Comunican por sus extremos inferiores y por un cilindro de hierro al cual están adaptados con el depósito H que contiene mercurio. Sobre este depósito hay una bomba *p* aspirante é impelente con una llave R merced á la cual se puede interceptar como se quiera la comunicacion con los tubos. V es el recipiente para almacenar el gas seco: P una bomba de compresion que sirve para dar al gas el grado de compresion deseado. La rama menor R del manómetro comunica con V, y una llave *r* intercepta esta comunicacion cuando se ha introducido el gas y rechazado el mercurio hasta la parte inferior del tubo.

Fácil es ahora comprender cómo funciona el aparato. Una vez comprimido el gas seco en V, se abren las llaves, el gas penetra en el tubo B y repele el mercurio, de modo que llena el tubo. La diferencia de nivel en B y en la columna A (que tiene 30 metros de altura) marca la presion del gas correspondiente á este volúmen. Ciérrase en seguida la llave *r* y se maneja la bomba *p* que empuja el mercurio y comprime el gas. Cuando este queda reducido á la mitad de su volúmen, se anota de nuevo la diferencia de nivel del mercurio en B y en A, y se tiene la presion del gas así comprimido.

aparato de la figura 99, ideado por el segundo de dichos físicos, hace patente la diferencia de compresibilidad de los varios gases.

Este aparato consiste en un cilindro de palastro A que contiene mercurio y que por medio de un tubo de hierro está en comunicacion con una caja de palastro tambien, en la cual encajan sólidamente dos tubos TT, de dos metros de largo cada uno, y de dos á tres milímetros de diámetro. Los gases secos cuya compresibilidad se desea comparar se introducen por la parte superior de dichos tubos que deben estar perfectamente calibrados. Se hace de modo que los gases ocupen el mismo volúmen, y luégo se cierran los tubos á la lámpara. En este momento, la presion y el volúmen son idénticos para ambos gases. Para hacerlos variar, se cierra el cilindro A, lleno de aceite por encima del mercurio, con un émbolo P que en su parte superior es un tornillo que gira en una tuerca. Merced á una palanca L se puede introducir hasta donde se quiera el émbolo en el líquido comprimiendo de esta suerte el mercurio, el cual trasmite su presion á los gases de los dos tubos T. Por tal medio se reconoce que los volúmenes no continúan los mismos, y que la ley de compresion varía de un gas á otro.

Œrstedt y Wendsen encontraron exacta la ley de Mariotte, en cuanto al aire, hasta 8 atmósferas, y los famosos experimentos de Dulong y Arago, que tan sólo hemos mencionado, avanzaron la comprobacion hasta 26 atmósferas. Pouillet la llevó hasta 100. Pero en los procedimientos empleados habia varias causas de error, la más sensible de las cuales procedia de que cuanto mayor era la presion, más reducido era el volúmen ocupado en el manómetro por el gas, convirtiéndose los errores constantes de lectura en fracciones importantes de los resultados.

M. Regnault obvió esta causa de inexactitud disponiendo sus aparatos (fig. 100) de modo que los volúmenes subsistiesen casi constantes miéntras durase el experimento. Hizo más de una serie de correcciones á cuyo detalle no podemos descender y que dieron notable precision á los resultados de sus investigaciones, resultados que resumiremos en sus caractéres esenciales.

La compresibilidad del aire, que siempre es algo mayor de lo que exigiria la ley de Mariotte, va en progresivo aumento con la presion. El ázoe nitrógeno se halla en el mismo caso que el aire, si bien es ménos perceptible el aumento de la compresibilidad con la presion. El ácido carbónico se separa más aún de la citada ley.

Por lo que hace al hidrógeno se aparta tambien de ella, pero en sentido contrario, y además la compresibilidad disminuye en lugar de crecer con la presion.

Por consiguiente, se debe considerar la ley de Mariotte como una aproximacion, no como ley rigurosa, si bien en la práctica puede pasar por verdadera, y aplicarla siempre que no se trate de casos especiales en que las pertubaciones fuesen bruscamente considerables.

LIBRO SEGUNDO—LA GRAVITACION

CAPÍTULO PRIMERO

LA GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE Y EN EL INTERIOR DEL GLOBO TERRESTRE

I

¿ES LA GRAVEDAD UNA FUERZA CONSTANTE?

La experiencia ha demostrado, segun queda probado en los anteriores capítulos, que la gravedad obra del mismo modo en cualquier masa, sin que influya en ello la naturaleza física ó química de la sustancia de que ésta se componga ni la pequeñez de las partículas sometidas á su influencia. Así pues, se debe considerar la accion que ejerce en todo cuerpo como la resultante, como la suma de sus acciones elementales en todas las moléculas de que el cuerpo está formado.

Esta resultante es lo que constituye el *peso* del cuerpo.

Por otra parte, al estudiar los físicos las leyes de la caida de los graves en el vacío, han consignado que á dichas leyes obedece todo movimiento uniformemente acelerado, es decir, todo movimiento producido por la accion de una *fuerza constante*.

Así pues, la gravedad es una *fuerza constante*, es decir que miéntras dura, obra de un modo igual, uniforme. Esta misma continuidad explica, en virtud de la suma incesante de los esfuerzos elementales, el aumento de la velocidad en proporcion de los tiempos, y el de los espacios recorridos en proporcion de los cuadrados de los tiempos. La teoría demuestra la necesidad de estas leyes, y la práctica las ha confirmado con toda la precision que permiten los procedimientos del método experimental.

Con todo, importa no equivocarse sobre lo que debe entenderse por la constancia de la fuerza llamada gravedad. Admítese tambien (y es un principio adoptado en física lo mismo que en química) la invariabilidad del peso de una cantidad dada de materia, de un cuerpo determinado cualquiera.

En rigor, ni la intensidad de la gravedad es constante, ni el peso de un cuerpo invariable, á ménos de considerar la gravedad y su accion sobre el cuerpo, en un mismo punto determinado del globo terráqueo. Lo realmente invariable es la masa, que algunas veces se define diciendo que es la cantidad de materia (1); réstanos hacer ver que no sucede lo propio con la intensidad de la gravedad, y tampoco por consiguiente con el peso, que es una funcion de esta intensidad.

Consideremos un cuerpo cuya masa sea tal que, en Paris, á los 48° 50' de latitud y á una altura dada sobre el nivel del mar, tenga, pesada en el vacío á 4° centígrados de temperatura, un kilógramo de peso. Tal seria por ejemplo un decímetro cúbico de agua destilada, á cero de altitud; pero tomemos una sustancia cualquiera, un trozo de platino que tenga la misma masa y por consiguiente el mismo peso en tales condiciones, y cambiémosle de lugar. Si lo acercamos al polo, es decir, si la latitud del lugar crece, el peso de la masa invariable de que se trata crecerá tambien; el mismo cambio ocurrirá si, dejándolo á la misma latitud, se le bajara á un punto inferior al nivel del mar ó á mayor profundidad en el interior del suelo. Al contrario,

(1) Una proposicion formulada en mecánica del modo siguiente precisa con mayor claridad la idea de lo que es una masa: «Dos cuerpos de cualquier especie tienen la *misma masa* cuando dos ó más fuerzas iguales producen movimientos idénticos en dichos cuerpos libres y partiendo del estado de reposo.»

el peso de la masa de platino en cuestion disminuiria gradualmente si la trasportásemos desde Paris á un punto más cercano del ecuador, ó si, sin cambiar de latitud, pudiéramos elevarla en la atmósfera á altitudes cada vez mayores.

Para que semejantes variaciones sean posibles, y muy luégo veremos cómo se pueden comprobar prácticamente, es absolutamente preciso que, no habiendo cambiado la masa y subsistiendo idénticas y en igual número las moléculas del cuerpo, es preciso, decimos, que la fuerza aplicada á cada una de ellas, ó sea la gravedad, varíe de intensidad cuando la latitud ó la altitud varían. Esta consecuencia inevitable es en alto grado interesante para la física del globo: veamos pues cómo se llega á establecerla de hecho.

Desde luégo se comprenderá que con una balanza no será posible comprobar las variaciones de intensidad de la gravedad, por cuanto

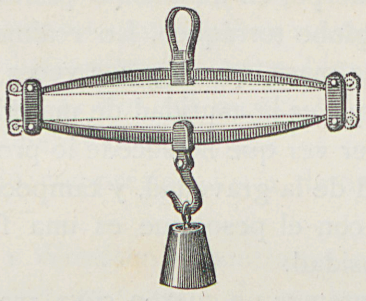


Fig. 101. — Dinamómetro

todo cambio en más ó en ménos que afectara al cuerpo pesado afectaria tambien del mismo modo á las pesas que lo equilibran. Este inconveniente desaparece si para medir la intensidad de la gravedad se hace uso de los instrumentos de muelles conocidos con el nombre de dinamómetros (fig. 101). Trasportando á altitudes y latitudes diferentes un aparato de este género, del cual se suspendiera una masa invariable, su aguja deberia indicar variaciones correspondientes á las de la intensidad de la gravedad. Pero en la práctica es todavía insuficiente este medio, porque, segun veremos más adelante, la sensibilidad de un dinamómetro no es bastante para marcar los imperceptibles cambios en cuestion.

Lo contrario sucede si en vez de medir la fuerza por sus efectos estáticos, tomamos como términos de comparacion los dinámicos, es decir, los movimientos que imprime á los cuerpos sometidos á su accion. Por esto se mide la intensidad de la gravedad mediante la rapidez que hace adquirir, al cabo de un segundo de caida, á un cuerpo que cae en el vacío. Esta velocidad es precisamente igual al doble del espacio recorrido por el móvil en el mismo tiempo. Acostúmbrase representar esta cantidad por la letra g. Para averiguar su valor podria hacerse uso de cualquiera de las máquinas por medio de las cuales demuestran los físicos, segun hemos visto, las leyes de la gravedad: sólo que, por lo que respecta á la máquina de Atwood, habria que multiplicar la velocidad ó el espacio recorrido por la relacion $\frac{p+2m}{p}$, siendo p el peso adicional que pone la máquina en movimiento y $2\ m$ el de las dos masas iguales sostenidas por el hilo que se enrolla en la polea. Se deberia además tener en cuenta la resistencia del aire, y los roces de toda clase que resultan en las piezas de estas máquinas. Todas estas causas de inexactitud reunidas hacen tambien incómodo y defectuoso, si no absolutamente impracticable, este modo de experimentacion.

Por fortuna, la observacion del péndulo obvia todas estas dificultades de la manera más sencilla.

II

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SEGUN LA LATITUD

En efecto, gracias al péndulo se han reconocido por vez primera las variaciones que presenta la intensidad de la gravedad en los diferentes puntos de la superficie del globo terráqueo. La Academia de Ciencias envió en 1672 á Cayena al astrónomo francés Richer con objeto de que hiciese algunas observaciones. El primer cuidado de aquel sabio fué observar el péndulo de longitud invariable que habia llevado para medir el tiempo en sus observaciones, mas al llegar á Cayena advirtió con gran sorpresa que atrasaba dos minutos y medio diarios. Para remediar este retraso, Richer tuvo que acortar el péndulo una línea y cuarto. De regreso á Francia, ocurrió el fenómeno contrario, y el astrónomo tuvo que devolver al péndulo su longitud primitiva.

Este hecho de observacion, que asombró á los sabios del mismo modo que habia sorprendido á Richer, se comprobró tambien en otras circunstancias. Faltaba descubrir su causa, y á Newton le cupo este honor.

En su inmortal obra titulada los *Principios*, que vió la luz en 1687, quince años despues de la observacion de Richer, Newton estudia la importante cuestion de la figura del globo terráqueo, y viene parar á la conclusion, que no fué adoptada sino despues de prolijas controversias, de que la Tierra debe de tener la forma de una elipsoide aplanada en los dos polos, ó hinchada en el ecuador. La fluidez primitiva de la masa que ha constituido el globo, unida á la accion de la fuerza centrífuga desarrollada por el movimiento de rotacion, son las causas del achatamiento cuya necesidad demostró Newton, causas comprobadas positivamente por las mediciones geodésicas y cuyo valor se ha reconocido hoy como un poco mayor de $^1/_{300}$.

Partiendo de estos hechos, es fácil darse cuenta de las variaciones que debe experimentar la intensidad de la gravedad cuando se cambia de lugar en latitud, siguiendo un mismo meridiano.

Empecemos desde luégo por distinguir entre la fuerza atractiva de la Tierra, la que ejerce la masa entera del globo en cada punto de la superficie, y la gravedad, que es la fuerza real, en virtud de la cual todo cuerpo propende á caer en direccion de la vertical ó á pesar sobre su punto de apoyo. Nosotros observaremos únicamente los efectos de esta última.

Newton ha demostrado que la atraccion obra sobre una molécula cualquiera tomada en la superficie del globo como si toda la masa de la Tierra estuviera reunida en su centro: no varía de un punto á otro de la superficie sino en razon de la mayor ó menor distancia á que estos puntos se hallan del centro; luégo la forma de la Tierra es la de una elipsoide, aplanada en los polos de rotacion.

Todo meridiano es por consiguiente una elipse cuyo eje menor es el diámetro terrestre que va de polo á polo, resultando de aquí que los diferentes puntos de dicho meridiano están tanto más partados del centro de la elipsoide cuanto menor es su latitud, y como la atraccion de todo el globo terrestre, obrando cual si la masa entera estuviera reunida en su centro, disminuye proporcionalmente al cuadrado de las distancias al centro atrayente, síguese de aquí con toda evidencia que la intensidad de la gravedad debe ir en disminucion desde el polo al ecuador.

A esta razon primera se agrega otra. La gravedad, tal cual podemos medirla, ya sea por los pesos de los cuerpos, ó más bien por la velocidad

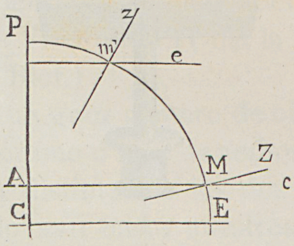


Fig. 102.—Direccion é intensidad de la fuerza centrífuga del ecuador á los polos

de su caida en el vacío, no es una fuerza simple, no es la fuerza de atraccion, de gravitacion de que acabamos de hablar; no habria identidad entre estas fuerzas sino en el caso de que la Tierra no tuviese movimiento de rotacion. En realidad la gravedad es una fuerza compuesta; es la resultante de la gravitacion, por una parte, y de la fuerza centrífuga, por otra. Si la fuerza centrífuga fuese en todas partes la misma, la gravedad no creceria del ecuador al polo sino segun las variaciones de distancia debidas á la forma elíptica del meridiano; seria la atraccion disminuida en una cantidad constante. Pero no sucede así; sábese que para una misma velocidad angular, la fuerza centrífuga desarrollada por un movimiento de rotacion crece con la longitud del radio del círculo descrito, ó sea de la distancia MA (fig. 102) del punto al eje de rotacion. La fuerza centrífuga llega á su máximum en el ecuador y va en disminucion á medida que la latitud aumenta hasta los polos, en donde, siendo nula la velocidad de rotacion, esta fuerza es nula asimismo.

Si á esto se agrega que la direccion de dicha fuerza es precisamente opuesta á la de la atraccion en el ecuador, y que obra más y más oblicuamente á medida que la distancia á este es mayor, se comprenderá que por ambos motivos la disminucion de intensidad que experimenta la gravedad debe ser tanto más considerable cuanto menor sea la latitud.

Veamos ahora cómo se ha podido comprobar, merced á las observaciones del péndulo, la exactitud de estas previsiones de la teoría, y hasta qué punto ha sido posible semejante comprobacion.

Entre la longitud de la oscilacion de un péndulo, la duracion de una oscilacion isócrona y

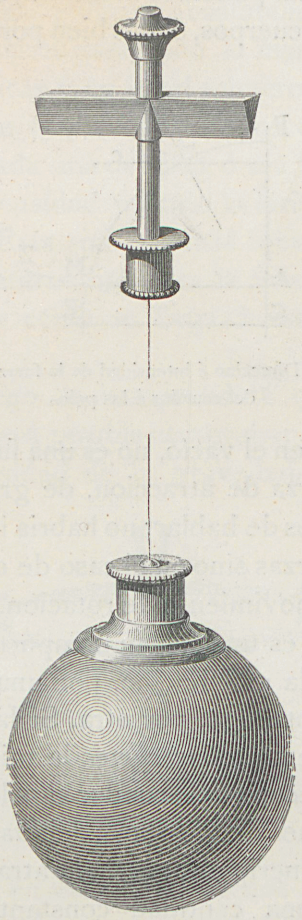


Fig. 103.—Péndulo de Borda (esfera de platino y cuchilla de suspension)

la intensidad de la gravedad en el punto en que se hace la observacion, existe una relacion ó fórmula muy sencilla que, cuando se conocen los dos primeros datos, permite calcular fácilmente el tercero, es decir, la intensidad de la gravedad. Tómase un péndulo de longitud invariable, como el péndulo reversible de Kater del que hemos hablado en el capítulo V; entónces la intensidad de la gravedad en las diferentes estaciones de la superficie del globo en que se observe este péndulo será proporcional á los cuadrados de los números de oscilaciones contadas en el mismo espacio de tiempo, por ejemplo, en el trascurso de un dia solar medio. De aquí resulta un primer método que han puesto efectivamente en práctica varios físicos.

Hay otro métodos que consiste en hacer oscilar un péndulo, contando cuidadosamente el número de sus oscilaciones así como su longitud en el momento del experimento y deduciendo luégo por el cálculo la longitud del péndulo simple que marcase los segundos en la misma estacion. Las longitudes comparadas del péndulo de segundos en distintos lugares permiten entónces calcular las relaciones que existen entre las intensidades de la gravedad en los mismos lugares.

Citemos algunos ejemplos del primer método. «Se ha visto, dice sir J. Herschel en sus *Outlines of Astronomy*, que un péndulo de cierta forma y de determinada longitud, ejecuta en el ecuador 86,400 oscilaciones en un dia solar medio, y que el mismo péndulo trasladado á Lóndres, verifica en igual espacio de tiempo 86,535. Debemos deducir de aquí que la intensidad de la fuerza que actúa sobre el péndulo en el ecuador es á la que lo pone en movimiento en Lóndres, como el cuadrado de 86,400 es al de 86,535, ó sea : : 1 : 1,00315; ó en otros términos, que una masa de materia que pesara en Lóndres 100,000 libras ejerce en el suelo la misma presion ó el mismo esfuerzo para aplastar los cuerpos sobre los que está colocada, que ejercerian 100,315 *de las mismas libras* trasportadas al ecuador.» Otro ejemplo: Un péndulo, cuya longitud de oscilacion es de *un metro*, ejecuta en Paris en el vacío 86,137 oscilaciones en un dia solar medio; trasladado á los polos ejecutaria 86,242 al paso que en el ecuador este número quedaria reducido á 86,017. Las intensidades de la gravedad en estos tres puntos son proporcionales á los cuadrados de las tres cantidades, ó á los números siguientes: 100000, 100244, 0,99861. De donde se sigue que un cuerpo pesado en Paris, y cuyo peso fuese de 100,000 kilógramos, trasportado á los polos experimentaria un aumento de 244 kilógramos, y en el ecuador no pesaria más que 99'861 kilógramos ó habria sufrido una disminucion de 139.

Hemos dicho anteriormente y creemos útil repetirlo, que estas variaciones no se conocerian sino con el dinamómetro y no con la balanza, por cuanto en este último caso las pesas sufririan á su vez las mismas variaciones.

Pasemos ahora á las observaciones del péndulo por el segundo método, que es el de que

se valieron Borda y Cassini, y posteriormente Biot y Mathieu en Paris, Dunkerque y Burdeos.

El péndulo de Borda, tal cual lo emplearon Biot y Mathteu, consistia en una bola de platino de 36 $^1/_2$ milímetros de diámetro, suspendida de un hilo metálico finísimo, el cual va

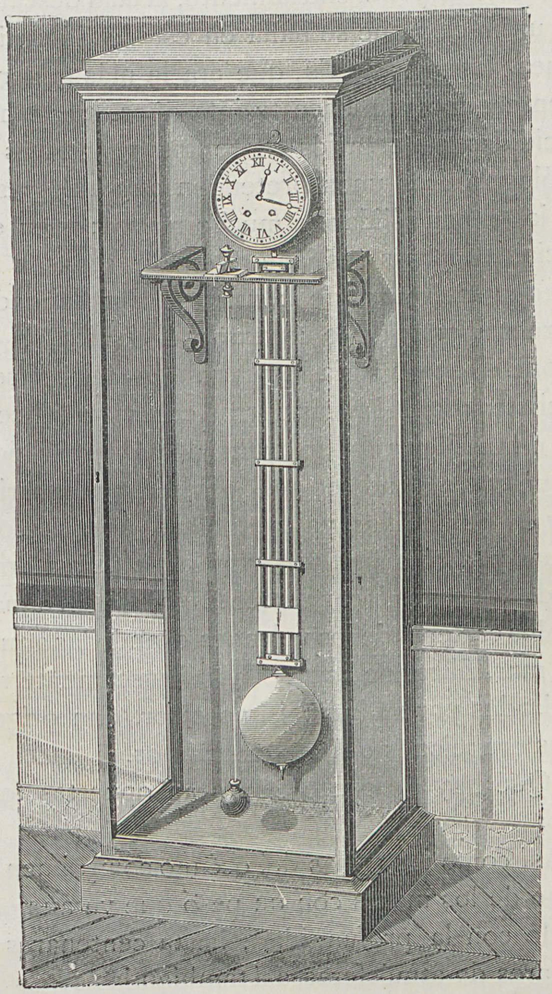


Fig. 104.—Péndulo de Borda. Medida de la duracion de una oscilacion por el método de las coincidencias

sujeto á un casquete esférico untado de una ligera capa de sebo; la extremidad superior del hilo estaba sujeta á una cuchilla de suspension semejante á la que soporta la barilla ó péndola de los relojes (fig. 104). Esta cuchilla descansaba en dos planos fijos, bien pulimentados, de piedra muy dura y cuya posicion era perfectamente horizontal: los planos se apoyaban á su vez en una fuerte armadura de hierro sostenida en unos soportes empotrados en una sólida pared, de suerte que se obtuviera una inmovilidad completa.

Las oscilaciones se contaban por comparacion con las del péndulo de un reloj adosado tambien á la pared, cuya marcha se habia arreglado por observaciones de estrellas. Con auxilio de un anteojo colocado á diez metros de distancia, se observaban las coincidencias sucesivas de ambos péndulos, y del número de estas coincidencias así como del de los segundos trascurridos se deducia el de las oscilaciones.

Una vez conocido este número, se medía la longitud del péndulo, valiéndose al efecto de operaciones delicadísimas, cuyo detalle es ajeno á este lugar. (V. el tomo II de la *Astronomía física* de M. Biot.)

Poseemos un gran número de observaciones efectuadas por uno ú otro de ambos métodos en regiones muy distintas de los dos hemisferios, desde el siglo XVII hasta nuestros dias, y en cuyos trabajos, de tan grande importancia para la física del globo, han tomado parte los sabios más ilustres.

El cuadro siguiente, que da en milímetros la longitud del péndulo de segundos para Paris, demuestra el acuerdo que existe entre los resultados y la precision con que se han llevado á cabo todos los experimentos:

LONGITUD DEL PÉNDULO DE SEGUNDOS EN PARIS

Observadores	Milímetros
Picard.	994,000
Richer y Huygens.	994,200
Godin.	993,930
Bouguer.	994,180
Mairan.	994,032
Whitherust.	993,877
Borda	993,896
Biot y Mathieu.	993,915
Kater y Sabine.	993,998
Bessel.	993,781

El promedio general seria 993^{mm},981; pero limitándose á los seis últimos resultados se ve que la longitud del péndulo de segundos en Paris es 993^{mm},916.

La intensidad correspondiente de la gravedad está expresada por la cifra 9^{m},8096, que, segun se sabe, es la velocidad adquirida en un segundo por los cuerpos graves que caen en el vacío.

Acabamos de presentar la longitud del péndulo de segundos para Paris: ahora agregaremos los valores que el cálculo y las observaciones designan como longitud del mismo péndulo en los polos, en el ecuador y á la latitud media de 45

grados, así como las cifras que expresan la intensidad de la gravedad en dichos parajes.

	Longitud del péndulo de segundos	Intensidad de la gravedad
	mm	mm
En el ecuador	991,03	9,78103
A los 45° de latitud	993,52	9,80606
En los polos	996,19	9,83109

III

FIGURA DE LA TIERRA DETERMINADA POR LA GEODESIA

Las ciencias físicas y naturales abarcan en su objeto el universo entero; pero sus resultados, aplicados directamente al estudio del globo que habitamos, tienen para nosotros una importancian más inmediata y tan evidente que es innecesario insistir sobre este punto. No es posible conocer la constitucion de nuestra Tierra, considerada en su superficie sólida ó líquida, en su envolvente atmosférica así como en sus capas interiores, sino recurriendo á la vez á la astronomía, á la física, á la geografía, á la meteorología y á la geología; cada una de cuyas ciencias proporciona de este modo materiales para otra ciencia especial, á la que se ha convenido en dar el nombre de *física del globo.* En el curso de esta obra veremos sucesivamente la parte que la física ha tenido hasta aquí en sus progresos, y en este momento nos proponemos entrar en algunos detalles acerca de la aplicacion de la teoría de la gravedad á varias cuestiones, unas resueltas, otras solamente bosquejadas, y todas ellas del mayor interés para conocer nuestro planeta.

Gracias á los trabajos de los geómetras y astrónomos de los tres últimos siglos, hoy conocemos, aproximadamente al ménos, la figura y dimensiones de la Tierra; pero es muy poco lo que se sabe acerca de la estructura interna y del estado físico de las capas situadas más abajo de cierto límite, porque las observaciones directas apénas han podido pasar hasta el presente de un kilómetro en los más profundos pozos de mina (1).

¿Cómo está constituido este núcleo interior del globo terrestre? ¿Es flúido como lo suponen ciertas teorías geológicas, basadas por una parte en las observaciones de las temperaturas crecientes con la profundidad y por otra en la forma actual de la Tierra, resultante de una fluidez hipotética primitiva y total? En este caso, el suelo estaria formado por una delgada capa solidificada por el enfriamiento, la cual descansa en un núcleo que se halla en estado de fusion ígnea. Esta hipótesis, que era la más generalmente adoptada hace treinta años, tiene hoy decididos adversarios entre los geómetras y geólogos. Los unos pretenden que el espesor de las capas sólidas es mucho mayor; y en especial Hopkins sostiene que este espesor no puede ser menor que la cuarta parte del radio terrestre, pues de lo contrario el fenómeno de la precesion no seria lo que resulta de las observaciones astronómicas. Otros creen que el centro de la Tierra fué lo primero que se solidificó, y que entre el núcleo sólido y la costra exterior hay capas líquidas, ya continuas, ó bien discontinuas y locales, que son esos lagos de materias flúidas, de lavas incandescentes que se derraman por los cráteres de los volcanes, cuando las aguas del mar, filtrando hasta ellas y bruscamente vaporizadas por su intensísimo calor, dan orígen á las erupciones y á los terremotos.

¿Qué hay de cierto entre tan opuestas teorías?

Así como las aguas del océano comprimen el lecho de los mares con un peso que va aumentando con la profundidad, hasta centenares y millares de atmósferas, así tambien las capas de la parte sólida del globo pesan unas sobre otras, desde la superficie al centro. ¿Cuál es el efecto producido por esta presion que forzosamente debe llegar á intensidades tan enormes? Que de ella resulta seguramente una compresion que aumenta progresivamente la densidad de las materias subyacentes. Pero ¿con arreglo á qué

(1) El sondeo de Mouille Longe, cerca del Creusot, ha llegado á 920 metros de profundidad, que, como se ve, viene á ser la 7000.ª parte del radio terrestre. M. de Lesseps ha presentado á la Academia de Ciencias, en la sesion del 10 de mayo de 1880, una comunicacion de la cual extractamos las líneas siguientes: «Las minas de plata que dirige M. Mackay en Virginia City (California) son muy importantes. Las galerías llegan actualmente á 1,000 metros de profundidad, y M. Mackay se propone seguir profundizándolas todavía. Es sabido que el mayor límite á que se ha llegado en Europa en las minas de Bohemia apénas pasa de 1,000 metros.» Los aeronautas se han elevado en la atmósfera á la altura máxima de 8,000 metros, ó sea á la 8.ª parte del radio terrestre sobre el nivel del suelo; en el océano, la sonda ha penetrado á 5 ó 6 kilómetros de profundidad, ó á 12 kilómetros segun ciertas valuaciones que no merecen entero crédito. De todos modos el espesor de las capas del globo exploradas, sólidas, líquidas ó aéreas es relativamente muy escaso.

ley se efectúa esta compresion? ¿Cuáles son sus límites? ¿Cuál su efecto en el estado físico, en la temperatura, por ejemplo, de las capas internas? Muchos sabios han planteado este problema, pero ninguno lo ha resuelto, que sepamos.

Pronto veremos que la masa del globo terráqueo no es homogénea; este resultado, que se desprende á la vez de las observaciones del péndulo, de la forma actual de la Tierra y de su rapidez de rotacion, ¿no habria podido considerarse como consecuencia obligada de las presiones crecientes que ejercen las capas concéntricas unas sobre otras?

Todos estos y otros muchos problemas son de capital importancia para la constitucion física del globo terráqueo. Vamos á ver cómo puede servir el conocimiento de las leyes de la gravedad para resolverlos particularmente.

La astronomía y la geodesia nos suministran desde luégo los datos indispensables para ello.

En primer lugar figuran los que se refieren al movimiento de rotacion de la Tierra. Las observaciones celestes demuestran la uniformidad y la constancia casi absoluta de este movimiento que se efectúa en un dia sidéreo, ó sea en 86,164 segundos de dia solar medio, al rededor de un eje que pasa por dos puntos del globo, y cuya situacion puede considerarse como fija, si se la juzga por la invariabilidad de las latitudes geográficas (1). Exceptuando los polos, que permanecen inmóviles, todos los puntos de la superficie terrestre están animados de la misma velocidad angular. Pero sus velocidades reales ó sus cambios de lugar en el espacio varian en proporcion de sus distancias al eje, ó segun las dimensiones de los radios de los diferentes paralelos.

Aun cuando la realidad de este movimiento de rotacion se desprende con sobrada evidencia de los más sencillos fenómenos astronómicos, y podria inducirse por analogía de las rotaciones observadas de los planetas y del Sol, no será supérfluo verla confirmada por experimentos de física ó de mecánica. Hemos visto ya que en la caida de los graves ejerce cierta influencia la fuerza centrífuga engendrada por la velocidad de rotacion, y que todo cuerpo en lugar de seguir rigurosamente la vertical, se desvía al sudeste. Esta misma fuerza centrífura altera en cada punto del globo la intensidad que, á no ser por ella, tendria la atraccion de toda su masa, y los experimentos hechos con el péndulo manifestarán una vez más la exactitud de la teoría, comprobando sus consecuencias.

Para esto se requieren nuevos datos, siendo la geodesia la que los proporciona á la física; estos datos se refieren á la forma y dimensiones de nuestro globo, y como son interesantes en sí mismos, haremos un rápido resúmen de ellos.

Que la Tierra, considerada en su conjunto, tiene forma esférica, es una verdad bastante antigua, aunque ha necesitado mucho tiempo para popularizarse. Los astrónomos y geómetras antiguos, desde Aristóteles, Posidonio y Eratóstenes hasta Estrabon (2), no tan sólo admitian esta forma, sino que la habian deducido de observaciones y medidas que no distaban mucho de ser exactas. Hasta mediados del siglo XVI nadie volvió á ocuparse de la solucion de este problema, habiéndolo resuelto el médico francés Fernel mediante un procedimiento sobremanera sencillo, de resultas del cual dedujo, con algunas toesas de diferencia, la misma cifra para el grado del meridiano en Francia

(1) Si la Tierra fuese esférica, los meridianos serian círculos y los radios de los paralelos tendrian entre sí la misma relacion que los cosenos de las latitudes. Seria pues preciso llegar á los 60° de latitud para que la velocidad de rotacion quedase reducida á la mitad de la rapidez de un punto cualquiera del ecuador, es decir, á la mitad de la velocidad máxima.

(2) «Admitimos en primer lugar que la tierra y el mar, tomados en su conjunto, presentan la forma de una esfera, considerando la primera al mismo nivel que la superficie de las altas mareas, puesto que las prominencias del relieve terrestre desaparecen en cierto modo en la inmensa extension de la tierra, y se las debe considerar como muy poca cosa, ó más bien como nada. No pretendemos con esto atribuir á la tierra y al mar, tomados en su conjunto, la esfericidad perfecta de una de esas figuras que salen del torno, ó de las que el geómetra imagina; lo único que queremos decir es que la forma de la tierra es, en apariencia, toscamente esférica.»

Estrabon, que se expresa así en el libro II de su *Geografía*, adopta un poco más adelante las dimensiones de la Tierra tales cuales las habia deducido Eratóstenes de la distancia y de la diferencia de latitud de Siena y de Alejandría, ó sea 252,000 estadios como circunferencia del ecuador. Tomando el estadio de 180 metros, resultan 45.360,000 metros, valor que es $^1/_8$ mayor.

Posidonio habia deducido 240,000 estadios observando la estrella Cánope, que se eleva 7°30' sobre el horizonte de Alejandría, al paso que dicha estrella rasa con el horizonte de Rodas. Su medida excede todavía $^1/_{13}$ de la verdadera. Más adelante, Tolomeo dedujo para el grado del meridiano una longitud de la que resultaban 38.800,000 metros para la circunferencia ecuatorial. Y por último, los geógrafos árabes del tiempo de Al-Mamun, obtuvieron por resultado una cifra equivalente á 42.500,000 metros.

Refiriéndonos á aquellas épocas y á la escasa precision de las medidas astronómicas, no puede ménos de sorprendernos la aproximacion con que habian podido ya calcularse las dimensiones del esferoide terrestre.

que Picard calculó un siglo despues, valiéndose de una triangulacion rigurosa.

Por lo demás en la época (1669) en que este astrónomo publicó el resultado de tan importante operacion, nadie sospechaba que la forma del globo terráqueo difiriese de la de una esfera, sino en cuanto las irregularidades del suelo de los continentes ó de las islas establecian alguna desemejanza con ella. En 1672 fué cuando Richer averiguó que el péndulo de segundos no tenia en Cayena la misma longitud que en Paris, y algunos años más tarde, al elaborar Newton la grande obra de la gravitacion universal, ocurriósele la idea de explicar este hecho imprevisto en virtud de las leyes mismas de la gravedad combinadas con el movimiento de rotacion de la Tierra.

Remontándose con el pensamiento al orígen de los tiempos, Newton supuso que la Tierra era una masa enteramente flúida, dotada en todas sus partes de un movimiento de rotacion alrededor de su eje. Si una masa semejante hubiese subsistido inmóvil, su forma hubiera sido la de una esfera perfecta, haciendo caso omiso de las acciones de la atraccion de los demás cuerpos celestes.

Pero como la rotacion engendra una fuerza centrífuga que crece con el radio, es decir, á

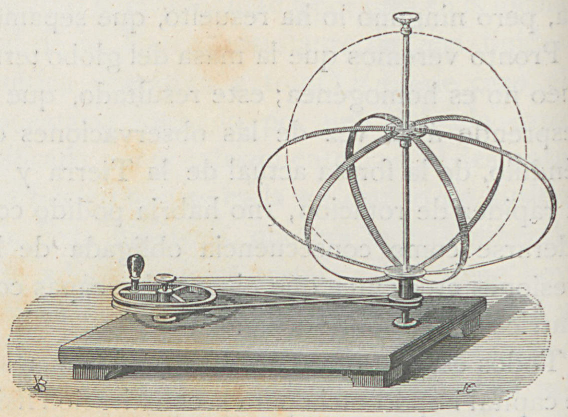


Fig. 105.— Aparato para demostrar el achatamiento del globo terráqueo por efecto de la fuerza centrífuga

medida que desde los dos polos inmóviles se pasa al ecuador, esta fuerza contraresta de un modo desigual la de la gravedad. Fácilmente se demuestra de un modo práctico la consecuencia de esta accion (1). La masa flúida, en lugar de acciones moleculares de sus propias partículas y por otra parte sufre una presion igual por el líquido ambiente, queda en perfecto equilibrio en forma de esfera. Pero si se la imprime un rápido movimiento de rotacion merced á un eje provisto de un aro metálico que pase por su centro y á un manubrio adaptado al eje por fuera de la cubeta ó vasija (fig. 106), la esferilla de aceite se achatará hácia sus polos ó se dilatará en su ecuador (fig. 107), cuyo plano es el del aro que le comunica su movimiento. Si la rapidez crece, el achatamiento crece tambien hasta cierto límite en que ocurre un cambio de forma de que es supérfluo hablar aquí, pero al que se puede recurrir para dar una idea de la formacion de los anillos del planeta Saturno (fig. 108).

Newton ha hecho una demostracion teórica de este mismo caso, que cuadra en este lugar, porque es á propósito para hacer concebir la causa del achatamiento terrestre, sin necesidad de apelar á los métodos analíticos. Héla aquí:

Suponiendo que la masa flúida de la Tierra era homogénea y que la

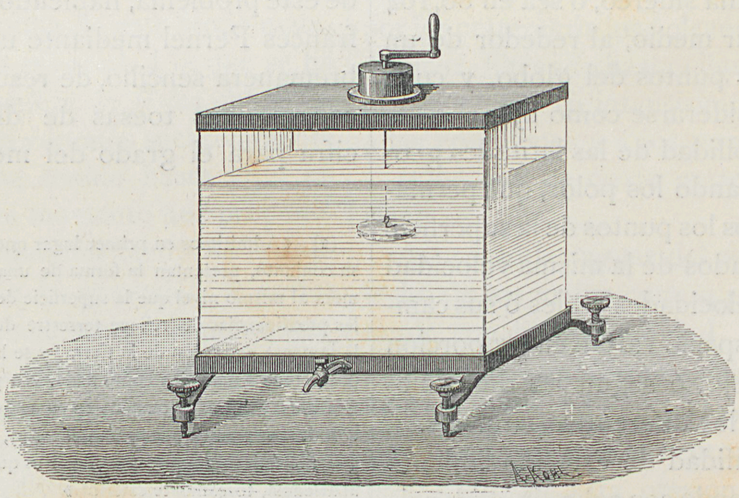


Fig. 106.—Aparato para los experimentos de M. Plateau sobre la fuerza centrífuga

(1) En las cátedras de física se demuestra con un aparato representado en la figura 105. Dos ó más círculos formados por delgadas cintas de acero se cruzan como los meridianos de una esfera en los dos extremos de un eje fijo, pudiéndoseles poner en movimiento alrededor de este eje por medio de un manubrio. Tan luégo como empieza la rotacion, los círculos ceden á la accion de la fuerza centrífuga desarrollada, gracias á su elasticidad que representa aquí la movilidad de las partículas de un flúido, y adquieren la forma de elipses aplanadas en los dos extremos del eje. El achatamiento es tanto mayor cuanto mayor es tambien la velocidad de rotacion.

M. Plateau se ha valido de otro experimento muy ingenioso para demostrar más directamente la forma elipsoidal que adquiere una masa flúida y que debió adquirir la Tierra por efecto de la fuerza centrífuga engendrada por su movimiento de rotacion.

Dicho experimento consistia en introducir en una mezcla de agua y alcohol de la misma densidad que el aceite, cierta cantidad de este último líquido, sustraida de este modo á la accion de la gravedad terrestre. Como la gota introducida así está sometida únicamente á las

conservar la forma esférica, que es la del equilibrio en estado de reposo, adquiere la de un elipsoide; se aplana en los dos polos y se dilata progresivamente desde ellos hasta el ecuador, en que la dilatacion llega á su máximum.

La hipótesis de Newton no dejó de tener contrincantes, y los sabios se dividieron en dos opuestos bandos, admitiendo unos el achatamiento de la Tierra en sus polos, y sosteniendo otros, por el contrario, que era más prolongada en el sentido de su eje. Resultó de aquí una larga controversia, en la que cada bando invocaba como testimonio las mediciones de los arcos de meridianos efectuadas en diferentes puntos de la superficie terrestre. Las expediciones científicas de suma trascendencia efectuadas por Bouguer, Godin y La Condamine al Perú, Clairaut, Maupertuis y Lemonnier á Laponia, y la gran triangulacion de la meridiana de Francia, llevada á cabo bajo la direccion de Lacaille y Cassini, pusieron fin á las incertidumbres y á las discusiones de los sabios.

El resultado de todas estas mediciones comparadas fué que la longitud del arco de un grado era menor en las regiones ecuatoriales que en las polares. La teoría de Newton triunfaba; la Tierra era decididamente un esferoide aplanado en sus polos ó dilatado en su ecuador. Faltaba conocer con exactitud el valor de este achatamiento, determinar la figura de los meridianos y paralelos.

Obra inmensa ha sido esta, qué ha requerido el concurso de los sabios, astrónomos, geómetras y físicos de todas las naciones, obra perfeccionada sin cesar hasta nuestros dias, y que no ha terminado aún. Seria menester un volúmen para exponer todas sus fases: pero no entra en el plan de esta obra dar siquiera un resúmen de ella.

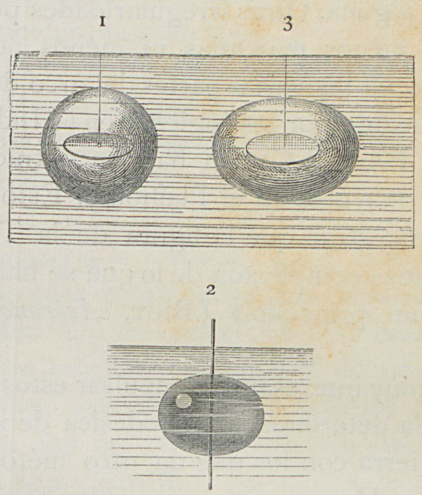
Contentémonos con indicar en breves líneas los principales resultados obtenidos, y con mostrar en qué pueden interesar estos resultados á la teoría de la gravedad.

Las numerosas mediciones de los arcos de meridianos y de los de paralelos dan al esferoide terrestre las dimensiones siguientes:

Radio del ecuador. . . .	6.378,233	metros	
Radio polar.	6.356,558	»	
Achatamiento.	21,675	»	ó 1/294,2
Circunferencia ecuatorial. .	40.075,620	»	
Elipse meridiana. . . .	40.014,430	»	

Sin embargo, estos números tan sólo representan aproximadamente la figura y dimensiones reales de la Tierra; suponen que nuestro globo es un elipsoide de revolucion; pero, segun hemos dicho ya, esto no es rigurosamente exacto: los meridianos no son elipses y además ni siquiera son curvas iguales, así como el ecuador

gravedad se dirigia hácia su centro, concebia dos columnas que iban á parar á dicho centro, pero una *o a* siguiendo la direccion del eje de rotacion CP, y la otra *b o* siguiendo la de un radio del ecuador CE (figura 109), se las puede considerar como los dos brazos de un sifon que se equilibran. En caso de reposo, las moléculas de ambas colum-



Figs. 107 y 108.—Efectos de la fuerza centrífuga en una esfera líquida: 1, esfera inmóvil; 2, esfera animada de cierto movimiento de rotacion; 3, esfera y anillo, movimiento más rápido.

nas gravitan sobre C con todo su peso, que no depende sino de la gravedad; esta accion es igual en los dos casos, de suerte que las columnas deben ser iguales en longitud; pero el movimiento de rota-

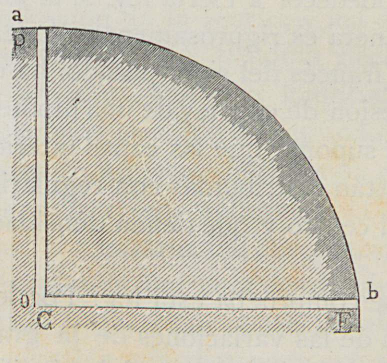


Fig. 109.—Demostracion de Newton

cion aminora esta accion en toda la columna ecuatorial, cuyas moléculas propenden á alejarse del centro en virtud de la fuerza centrífuga, al paso que dicha aminoracion es nula en la columna que va á parar al polo. Para que haya equilibrio se necesita que la columna ecuatorial sea de mayor longitud que la otra, exceso que compensa el aligeramiento de peso debido á la fuerza centrífuga. Así pues, el radio polar debe ser menor que el radio del ecuador, y Newton deducia de aquí la necesidad de que el esferoide terrestre estuviese achatado en sus polos de rotacion.

y los paralelos difieren más ó ménos de la forma del círculo.

Pero si todavía no se ha determinado con toda la precision que hay lugar á esperar la forma y dimensiones del globo terráqueo, si hay desigualdades cuyo número y extension no se conocen todavía perfectamente, si aún quedan incertidumbres sobre el valor del achatamiento polar, no debemos exagerar la importancia de estas divergencias y de estas desigualdades. Para que se comprendan mejor, nos valdremos de un término de comparacion vulgar. Supondremos el globo representado por una bola de unos 30 centímetros de diámetro. Dada esta dimension, seria imposible percibir á la simple vista el relieve de los continentes sobre el nivel del mar. Y en efecto, las cumbres de las más altas cordilleras, como los Alpes, los Andes, el Himalaya, etc., no tendrian más que uno ó dos décimos de milímetro; y aún este escaso relieve deberia entenderse, no desde los terrenos situados en la base de los picos, sino desde el nivel del Océano, de suerte que seria tan materialmente imposible que lo percibiera la vista como el tacto. El achatamiento mismo tampoco seria visible, puesto que la depresion de cada polo apénas llegaria á la mitad de un milímetro. Tampoco se podrian observar las demás desigualdades comprobadas por las mediciones geodésicas. Pero esto, como hemos dicho, no mengua en nada la importancia que pueden tener las determinaciones cada vez más rigurosas de la forma y dimensiones del globo terráqueo. Vamos á examinar nuevas pruebas de ello.

IV

DETERMINACION DE LA FIGURA DE LA TIERRA MEDIANTE LAS OBSERVACIONES DEL PÉNDULO

Acabamos de ver que la figura de la Tierra, determinada por los métodos geodésicos, es en su conjunto la de un elipsoide aplanado en los polos de rotacion ó dilatado en el ecuador. Sin embargo, se han descubierto en muchas regiones irregularidades muy perceptibles, ya en direccion de los meridianos ó ya en la de los paralelos, que no es posible atribuir á errores de observacion. Por ejemplo, «cuando se examina el arco de meridiano que va desde Greenwich á Formentera, las porciones sucesivas de este arco tomadas de norte á sur, dan disminuciones de grado que carecen en absoluto de ley, y hácia los 46° en particular presentan una gran anomalía. Ahora bien, si el meridiano terrestre fuese elíptico, la latitud media de este segundo arco es tal que la disminucion sucesiva de los grados deberia ser sensiblemente constante en toda su extension. El arco de paralelo, medido hace poco tiempo entre Burdeos y Padua, presenta fenómenos análogos, porque sus diversas partes, reducidas á una misma latitud, ofrecen en la longitud de los grados consecutivos considerables diferencias para las cuales tampoco hay ley alguna. Otras irregularidades por el estilo, no ménos marcadas ni ménos positivas, aparecen en las varias partes del arco del meridiano medido por los ingleses en la India, y los señores Plana y Carlini han encontrado otras todavía mayores en el Piamonte. Estos ejemplos demuestran que la figura de la Tierra es mucho más complicada de lo que se habia creido en un principio.» (BIOT, *Astronomía física.)*

Era muy interesante compulsar estos resultados de la determinacion geodésica de la figura de la Tierra con los que da otro método muy diferente. Hemos visto anteriormente que en términos generales, la intensidad de la gravedad varía con la latitud y crece del ecuador al polo. Estas variaciones motivadas por la forma sensiblemente elipsoidal de la Tierra, y tambien por la influencia ejercida por la fuerza centrífuga, deben obedecer á cierta ley, si la forma de nuestro planeta es rigurosamente elíptica. Clairaut, físico francés del siglo pasado, ha deducido la expresion de esta ley de una hipótesis que consiste en suponer que las capas interiores de la Tierra están distribuidas con regularidad alrededor del centro y que tienen densidades variables.

¿Cómo se comprueba esta ley? Por los efectos mismos de las variaciones de la gravedad, es decir, trasportando un péndulo á diferentes latitudes en ambos hemisferios, observando y contando las oscilaciones, y calculando la longitud precisa del péndulo de segundos (hechas todas las reducciones en el vacío y al nivel del mar) en las distintas estaciones. Si los resultados de este modo obtenidos concuerdan con los que la teoría permite prever, en las hipótesis de

la ley de Clairaut anteriormente expresadas, será prueba de que la figura de la Tierra es en efecto rigurosamente elíptica. Si, por el contrario, hay desigualdades, si las longitudes del péndulo, tal como se deducen de las observaciones, no siguen la ley en cuestion, sucederá una de dos cosas: ó estas desigualdades corresponderán precisamente con las que han reconocido los geodestas, y entónces la concordancia de los dos métodos será una confirmacion de estas irregularidades geométricas; ó no sucederá así, y entónces habrá que buscar la razon de las anomalías del péndulo en la constitucion íntima del globo terráqueo, en la falta de homogeneidad ó de elipticidad de sus capas.

En efecto, de la discusion de las numerosas observaciones del péndulo hechas hasta el dia ha resultado la comprobacion de dichas anomalías. Reuniendo todas las referentes al hemisferio boreal, se ha visto que existia un achatamiento igual á la fraccion $^1/_{293}$, al paso que las observaciones combinadas del hemisferio austral darian $^1/_{286}$, de suerte que el hemisferio sur debe estar más aplanado que el del norte.

Pero hay más aún. En el artículo siguiente veremos que en las oscilaciones del péndulo ejercen cierta influencia las masas de las montañas, y las de los continentes que, sobresaliendo del nivel del mar, aumentan la fuerza atractiva en dichas regiones. Tómese nota de esta atraccion del continente en que se opera, valiéndose de una correccion especial. Pero los experimentos hechos parecen estar en contradiccion con esta indicacion de la teoría; y así es que todas las observaciones del péndulo hechas en alta mar, ó en islas, dan una longitud demasiado grande para el péndulo de segundos, indicando un exceso de atraccion allí donde esta debiera ser menor si tuviese aplicacion la ley de Clairaut; por el contrario, las observaciones hechas en las estaciones continentales dan una longitud demasiado corta, y por consecuencia, muy poca fuerza atractiva. «No hay nada más sorprendente por este concepto, dice M. Faye en una Memoria recien publicada sobre tan interesante cuestion de la física del globo, que las últimas observaciones de los ingleses en las Indias. En la numerosa serie de medidas verificadas hasta en la mole del Himalaya, fué imposible descubrir el menor indicio de la presencia de dicha mole, al paso que con el mismo instrumento se encontraria una diferencia de atraccion entre el pié y la cúspide de una de las pirámides de Egipto.»

Ignórase la causa de estas anomalías, ó por lo ménos los sabios no están de acuerdo acerca de este punto. Saigey admite la suposicion de que «á igualdad de latitud el nivel de las aguas está *rebajado* en medio del Océano, de suerte que se acerca más al centro del globo; y que por el contrario, este nivel es más alto en la inmediacion de las grandes tierras, y por consiguiente más apartado de dicho centro.» En esta hipótesis, las desigualdades advertidas procederian simplemente de las diferencias de distancia de los puntos de observacion al centro de la Tierra.

Sir Airy, director del Observatorio de Greenwich, explica la falta de atraccion observada en el Himalaya, suponiendo que «esta cordillera tiene una densidad igual á la de las capas superficiales, y en virtud de su peso, penetra por su base en las capas todavía líquidas del interior cuya densidad es mayor, de suerte que el exceso de su atraccion arriba está compensado por la falta de atraccion del líquido desalojado abajo.»

Pero M. Faye hace observar que esta ingeniosa suposicion no se adapta á los fenómenos contrarios observados en alta mar con el péndulo, por lo cual propone una hipótesis que se puede resumir en sus puntos esenciales del modo siguiente:

El espesor de la costra sólida es menor bajo los continentes que bajo los mares. En efecto, la masa líquida tiene mayor conductibilidad calorífica que las rocas de la superficie; y por consiguiente, el núcleo flúido interno se enfria mucho más de prisa bajo el mar que bajo los continentes, de suerte que en la sucesion de los tiempos, la solidificacion ha sido allí más considerable. M. Faye supone además que la densidad de la costra es mayor que la de la capa flúida que limita el núcleo, de donde se sigue la atraccion más fuerte de las estaciones marítimas.

Sea de todo ello lo que fuere, lo cierto es que las observaciones del péndulo revelan irregularidades, bien en la forma ó ya en la constitucion interior de la Tierra, irregularidades cuya causa

no se ha averiguado todavía con exactitud, pero que no dejan de suscitar importantísimas cuestiones referentes á la física del globo. Vamos ahora á demostrar cómo se las ha aprovechado para resolver un problema no ménos interesante, el de la densidad del planeta.

CAPÍTULO II

DENSIDAD DE LA TIERRA

I

DENSIDAD DE LA TIERRA DETERMINADA POR LAS OBSERVACIONES DEL PÉNDULO

Conocidas ya las dimensiones de nuestro globo, fácil es calcular con suficiente exactitud su volúmen, que en rigor depende de la de las dimensiones lineales. Considerándolo como un elipsoide de revolucion, cuyos radios polar y ecuatorial son los expresados en la página 97, se ve que contiene 1.079,540 millones de cubos de un kilómetro de lado. Ahora, si fuese posible conocer la densidad media de la Tierra, es decir, la que tendria si, permaneciendo invariable su masa, fuese homogénea la materia de que ésta está formada, es obvio que bastaria una simple multiplicacion para conocer esta masa.

Aquí aparece de nuevo la dificultad que resulta de la imposibilidad en que estamos de explorar directamente las capas interiores de la Tierra. Fácil es averiguar merced á la observacion la densidad de las capas de la corteza, por cuanto están formadas de terrenos ó de rocas que tenemos á nuestro alcance; el elemento líquido ó la masa de las aguas tiene asimismo una densidad conocida; pero la investigacion inmediata no pasa de aquí. Y áun cuando se pudiera deducir de ella con bastante verosimilitud la densidad de las capas hasta la profundidad á que empieza, segun ciertos geólogos, el núcleo flúido, por ejemplo, á 60 kilómetros, tan sólo conoceríamos la masa de una parte relativamente pequeña del globo, ménos de la quinta parte. Más de los ocho décimos del volúmen quedarian sin poder medir.

Por fortuna, hay varios métodos gracias á los cuales es posible calcular ese precioso elemento de la densidad media de la Tierra, y como todos están basados en fenómenos de gravedad y de atraccion, su descripcion no huelga en modo alguno en este libro.

Todos estos métodos tienen en el fondo el mismo principio, que consiste en comparar la accion íntegra de la gravedad del globo terráqueo con la que produce una masa limitada, accesible á la observacion, y cuyo volúmen, densidad y peso se pueden medir con exactitud.

Segun las leyes conocidas de la atraccion terrestre, la intensidad de la gravedad varía con la latitud, y ya hemos visto que la observacion del péndulo nos da á conocer estas variaciones. Un péndulo de longitud invariable trasportado á diferentes distancias del ecuador da por dia un número de oscilaciones tanto mayor cuanto más elevada es la latitud del lugar de observacion, ó lo que es lo mismo, la longitud del péndulo de segundos es tanto más considerable cuanto más cerca se está del polo. Para que las observaciones de este género sean comparables, hay que corregirlas refiriéndolas al vacío, á cero del termómetro y al nivel del mar.

Esta última correccion es necesaria, puesto que la fuerza de gravedad depende de la distancia á que el cuerpo pesado se halle del centro de atraccion, y por consiguiente va disminuyendo segun que la altitud disminuye.

De aquí resulta que se puede calcular, ya la longitud del péndulo de segundos, ó bien el número de oscilaciones de un péndulo invariable, cuando se da la latitud del lugar de observacion. Para los diferentes puntos de un paralelo, estos números, referidos al nivel del mar, serian en todas partes idénticos, prescindiendo de los errores de observacion.

Supongamos pues que en dos estaciones A, B, poco distantes y situadas casi en el mismo paralelo se observa el péndulo; que se cuenta, por ejemplo, el número de sus oscilaciones en

un dia; y luégo, que se hacen las correcciones oportunas, para referir el resultado al mismo nivel que el del Océano. Claro está que las cifras obtenidas en las dos estaciones deberian ser idénticas si la altitud de los lugares fuese la misma. Si hay una diferencia superior á los errores probables de observacion, consistirá en que alguna influencia local habrá modificado la marcha del péndulo, ya en una, ya en otra de ambas estaciones. Si la cumbre B es la de una alta montaña, la accion de la masa de esta montaña será la que haya producido el efecto de que se trata, el cual consistirá en un aumento en el número de las oscilaciones del péndulo en



Fig. 110.—Bouguer

la estacion B. En A, era la masa de la Tierra la que producia su accion, considerada como una esfera sola; en B, es la misma masa aumentada con la de la montaña (fig. 111). Compréndese, en vista de esto, que sea posible deducir la re-

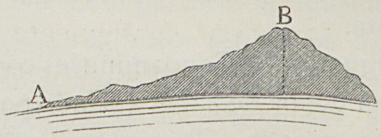


Fig. 111.—Influencia de la atraccion de las montañas en el péndulo

lacion que existe entre la masa de la montaña y la masa terrestre, y como conocemos ó podemos calcular la densidad y el volúmen de la primera de estas cantidades, otro tanto podemos hacer respecto del volúmen del globo. Merced pues al cálculo será posible averiguar la relacion que media entre las densidades de que tratamos.

Bouguer y La Condamine, los dos sabios franceses á quienes la Academia de ciencias envió al Perú con objeto de determinar la figura de la Tierra, se valieron por vez primera de este método. Observaron el péndulo á la orilla del mar, en Pará; despues en Quito, á una altitud 1,466 toesas mayor que la primera, y por último en el Pichincha, á 2,225 toesas sobre el océano. Aquel primer ensayo de la solucion de tan importante problema dió un resultado exagerado, pues la densidad de la Tierra hubiera sido cuatro veces y media tan grande como la de la Cordillera de los Andes.

En 1821, Carlini y Plana hicieron observaciones con el péndulo en el Mont-Cenis, y de su comparacion con las de Biot en Burdeos, dedujeron 4,39 como densidad media del globo, tomando por unidad la del agua.

Airy y Whewell se sirvieron en 1827 del mismo método, aunque de distinto modo. Los dos sabios compararon las oscilaciones del pén-

dulo en la superficie del suelo y á 372 metros de profundidad, en las minas de Doboath en Cornualles, y obtuvieron 6,57 como densidad de la Tierra.

Finalmente, observando M. Cazin en la isla de San Pablo en 1874, durante la expedicion que tuvo por objeto estudiar el paso de Vénus por el Sol, vió que la duracion de una oscilacion de su péndulo era de $0^s,997331$, miéntras que el cálculo daba $0^s,997477$ para la latitud de San Pablo y la altitud del punto de observacion. La diferencia prueba que la aceleracion es mayor de lo que indica la teoría, y que el aumento de $^1/_{3000}$ próximamente que resulta se debe á la atraccion local producida por la montaña de la isla. Pero todavía no está terminado, que sepamos, el cálculo de la densidad de la Tierra que se podrá deducir de esta observacion.

II

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE LA TIERRA POR LA DESVIACION DE LA PLOMADA CAUSADA POR LA ATRACCION DE LAS MONTAÑAS

La atraccion de las montañas se nota tambien de otro modo, y da lugar al segundo método del cálculo de la densidad de la Tierra.

Supongamos un observador provisto de una plomada y trasladándose sucesivamente al norte y al sur de una montaña M (fig. 112). La mole montañosa atraerá la pesa de la plomada, re-

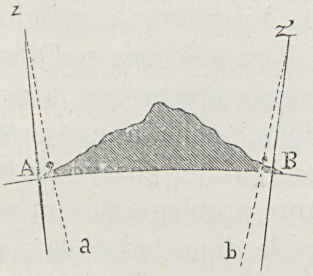


Fig. 112.—Desviacion de la plomada por la atraccion de una montaña

sultando de ello una desviacion. Si no hubiera mediado esta atraccion local, la vertical observada en A hubiese sido *z*A, pero la desviacion hará tomar al hilo la direccion *za;* en B, en vez de la vertical *z'*B, se observará la línea *z'b*.

Síguese de aquí que si el observador calcula la diferencia de latitud de las estaciones por la observacion de la distancia meridiana zenital de una misma estrella, hallará un ángulo mayor que el que obtendria deduciendo esta diferencia de la distancia AB medida por los métodos geométricos. El exceso será casi doble de la desviacion de la vertical. Si se opera á un mismo lado de la montaña, bien sea al norte ó al

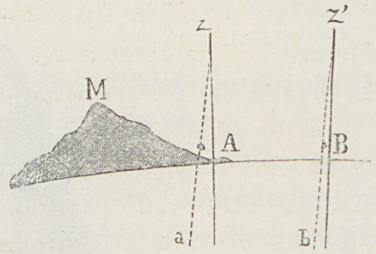


Fig. 113.—Atraccion de una montaña: desviacion de la plomada en dos puntos situados al norte ó al sur

sur, la diferencia de latitud procederá de la diferencia de las desviaciones, no de su suma, como se comprenderá fácilmente, aplicando el raciocinio que precede al caso representado en la figura 113.

Si la observacion permite comprobar la desviacion indicada así por la teoría, compréndese que la atraccion de la montaña se podrá comparar con la de todo el globo terráqueo, y que se tendrá de este modo la relacion entre la masa de la montaña y la de la Tierra.

Lo mismo que con el primer método, se puede llegar á conocer la densidad media de las rocas de la masa que se ha de calcular, y su volúmen; por otra parte, se tiene tambien el del globo, y por consiguiente será posible deducir de todos estos datos la densidad media del planeta.

A Bouguer y La Condamine les corresponde tambien el honor de haber apelado por primera vez á este método. Observaron la desviacion de la plomada producida por la masa del Chimborazo; pero las dificultades con que tropezaron no les permitieron llegar á un resultado que se acercara á la exactitud; el rigor del clima y la furia del viento contrarió la precision de sus observaciones y la cifra que dedujeron les hizo creer, más aún que la que habian obtenido en el Pichincha por el método del péndulo, que el Chimborazo es tan hueco como macizo; la naturaleza volcánica del monte les indujo á supo-

ner que habia enormes cavidades en los costados del cono (1).

Maskelyne reprodujo en 1774, bajo los auspicios de la Sociedad real de Lóndres, el método de las desviaciones de la plomada por la influencia de la atraccion de las montañas. Escogió dos estaciones al norte y al sur de una montaña cuya masa no es muy considerable, pero que tiene la ventaja de estar enteramente aislada: el monte Schehallien en Escocia. La distancia horizontal entre ambas estaciones era de $1330^m,25$, lo que, á la latitud de unos 57° correspondia á una diferencia de 43″ entre las latitudes de los dos puntos. Pues bien, de la observacion de las distancias zenitales de las estrellas, observacion que permite el uso de la plomada, resultó que la diferencia era de 54″,6. Los 11″,6 de más, no podrian proceder sino de la suma de las desviaciones debidas á la atraccion de la masa de la montaña, tanto en la estacion del norte como en la del sur.

Despues de una serie de mediciones laboriosas, se calculó el volúmen del monte Schehallien así como la suma de las atracciones en cada uno de los puntos de observacion, en la hipótesis de que su densidad fuese igual á la del globo terráqueo. Hutton, que se encargó de este trabajo, dedujo que la atraccion del monte habia debido ser la 9933.ª parte de la atraccion del globo, al paso que la desviacion producida indicaba la relacion de 1 á 17804. La conclusion que se ha de deducir de esto es que la densidad de la montaña no llega á la densidad media de la Tierra, siendo menor precisamente en la relacion de los números 9933 y 17804. En una palabra, la densidad de la Tierra debia ser 1,80, siendo la del monte Schehallien 1. Pues bien, despues de examinar las rocas que componen este monte, se vió que su densidad era igual á 2,61, y, por consiguiente, la del globo es 4,7, con relacion á la del agua. M. James ha obtenido por resultado 5,32 como densidad media de la Tierra, aplicando á sus observaciones el mismo método de las desviaciones de la plomada.

(1) Renovando Saigey el cálculo de Bouguer, en vista de las dos mejores observaciones de estrellas hechas por los dos sabios, ha obtenido 19″ de desviacion en vez de 7″,5 (*Física del globo*). De aquí deduce 1,83 para la densidad media de la Tierra, siendo 1 la del Chimborazo. Es poco más ó ménos la misma cifra que Maskelyne dedujo más adelante, empleando el mismo método.

III

DENSIDAD DE LA TIERRA: MÉTODO DE CAVENDISH

Como se ve, la ciencia llega á determinar tan fundamental elemento de la física del globo por aproximaciones sucesivas. Por esta causa conviene multiplicar los experimentos y compulsarlos entre sí, valorando cada uno de ellos en razon de la confianza que inspira, ó del error probable del resultado.

Fáltanos describir el tercer método, basado en la comparacion de las oscilaciones del péndulo con las de una masa sometida á la accion atractiva de otra masa muy próxima. La primera idea de este notable procedimiento se le ocurrió al sabio inglés John Mitchell, que se proponia averiguar lo que hubiera de cierto en las teorías de Newton, ó ver si la fuerza de la gravitacion, á la que se deben las leyes de los cuerpos celestes, obra del mismo modo entre pequeñas masas en la superficie del globo.

Pero habiendo fallecido John Mitchell ántes de realizar el proyectado experimento, legó su aparato á Wollaston, el cual se lo trasmitió á Cavendish. Este presentó en 1798 los resultados de sus trabajos. ¿En qué consiste el aparato que lleva el nombre de Cavendish? ¿Cuál es su principio? Procuraremos darlo á conocer.

Fíjanse dos esferas metálicas *mn* en la extremidad de una ligera varilla *ab*, que está suspendida por su parte media de un finísimo alambre sujeto en el techo de un aposento.

Si se separa la varilla ó una de las bolas de su posicion de equilibrio, y se abandona el conjunto á sí mismo, habrá una reaccion en virtud de la fuerza de torsion del alambre y resultará una serie de oscilaciones pendulares isócronas á una y otra parte de la posicion *ab*. Dos miras de marfil graduadas, puestas delante de las bolas y sujetas á la varilla, se mueven con ella, y sirven para determinar, mediante la lectura del número de divisiones recorridas, la posicion de equilibrio de la varilla, y la fuerza de torsion del alambre, y por consiguiente, la fuerza igual que la contrabalancea (fig. 114).

Sentados estos antecedentes, veamos cómo se pone en evidencia la atraccion recíproca de las masas contiguas.

Para ello se emplean dos gruesas esferas de

plomo M y N, que pesan unas doscientas veces más que las bolas *m* y *n*, y que se pueden colocar en varias posiciones simétricas con relacion á la varilla *ab*. Primero se las pone en ángulo recto, de modo que sus centros se hallen á igual distancia de cada una de las bolas, en A'B'. En esta situacion y siendo la atraccion por una y otra parte la misma, la varilla *ab* permanece en equilibrio. En seguida se acercan las esferas M y N á las dos bolas, en las posiciones AB ó A″B″; entónces la atraccion de M sobre *a* y la de N sobre *b* contribuyen á romper el equilibrio, y las bolas *a* y *b* se aproximan á M y N, y luégo efectúan una serie de oscilaciones isócronas alrededor de una nueva posicion de equilibrio que merced á las miras se puede determinar con exactitud. Entónces se mide, al mismo tiempo que la distancia de los centros de *a* y de M en esta nueva posicion, la duracion exacta de cada oscilacion.

Sin entrar en cálculos que exigirian una porcion de fórmulas matemáticas bastante complicadas, vamos á ver cómo podemos llegar por medio de este experimento, que prueba en cierto modo la existencia de una fuerza atractiva entre los cuerpos, á averiguar la masa y la densidad de la Tierra.

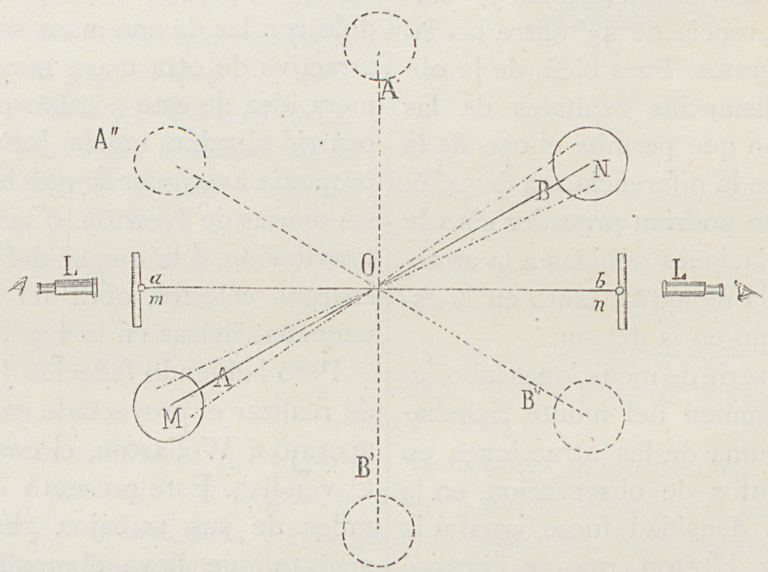


Fig. 114. — Trazado de las observaciones hechas con la balanza de Cavendish

Al oscilar las bolas *a b* alrededor del punto O en virtud de la accion de las masas M y N, forman un péndulo cuyo movimiento está sujeto á las mismas leyes que las de un péndulo oscilante por la accion atractiva de la masa de la Tierra, y por lo tanto puede deducirse la intensidad de la fuerza que lo pone en movimiento, de la duracion de sus oscilaciones y de su longitud; ó, lo que es lo mismo, si se calcula la longitud de un péndulo que ejecute las oscilaciones durante un mismo tiempo, habrá proporcion exacta entre las fuerzas atractivas de la masa M y de la terrestre y las longitudes de los péndulos isócronos. Mas, como por otra parte las atracciones son proporcionales á las masas y están en razon inversa de los cuadrados de las distancias, se hallará una relacion determinada entre la masa M y la masa del globo terrestre. Deducida así esta última, bastará dividirla por el volúmen de la Tierra para conocer la densidad media del globo.

Cavendish se sirvió para sus experimentos de una varilla de madera de abeto, reforzada con un alambre de plata. Cada una de las dos bolas pesaba 729^{gr},214 y las esferas de plomo 157^{k},925. Todo el aparato estaba metido en una habitacion perfectamente cerrada, en la que no penetraba el observador, y para evitar hasta las más leves agitaciones del aire, las bolas pequeñas y la varilla estaban en una caja de caoba que tenia agujeros en frente de las miras.

Las esferas se manejaban desde la parte de afuera. Por último, unas lámparas alumbraban las miras por una ventanilla provista de un cristal y practicada en la pared, y las observaciones se hacian con anteojos de retículos. La

figura 116 representa todos los detalles del aparato y las minuciosas disposiciones tomadas para apartar toda influencia perturbadora, sobre todo las de las variaciones de temperatura.

El resultado obtenido por Cavendish fué el número 5,48, deducido de varias series de experimentos.

Cuarenta años despues, Reich repitió las observaciones de Cavendish valiéndose del mismo

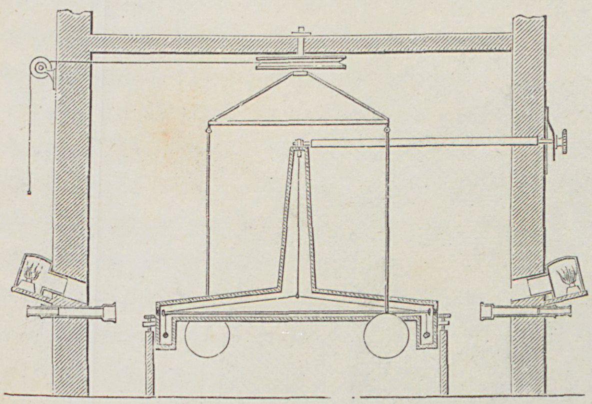


Fig. 116.—Balanza de Cavendish

método, y obtuvo 5,44, luégo 5,49 y por último 5,58 en 1849. Baily las reprodujo en 1843 perfeccionando y modificando el aparato y variando la naturaleza y dimensiones de las esferas pequeñas: las hizo sucesivamente de platino, bronce, zinc, vidrio y marfil, y tambien varió de clase y grosor los hilos de suspension. Más de 2,000 experimentos hizo este sabio, de los cuales dedujo el número 5,67 como densidad de la Tierra.

Finalmente, hace poco tiempo (en 1873), los físicos franceses Cornu y Baille acometieron de nuevo la solucion del problema por el método de la balanza de torsion de Cavendish; pero ya fuese con objeto de evitar las perturbaciones, ó ya con el de comprobar los experimentos anteriores, dichos físicos han modificado el aparato de Mitchell. Las masas atraidas eran dos bolas de cobre rojo, cada una de las cuales pesaba 12 kilógramos (1). Para evitar las perturbaciones que hubieran podido proceder de la electricidad, todas las piezas del aparato eran metálicas, y la palanca de la balanza, un tubo de aluminio: todas estas partes estaban en comunicacion constante con el suelo. Hiciéronse los experimentos en las cuevas de la Escuela politécnica. La duracion de las oscilaciones dobles resultó de unos $6^m 38^s$, y los señores Cornu y Baille dedujeron de una serie de 200 oscilaciones el número 5,56 como densidad de la Tierra, creyendo estar seguros de no haberse equivocado en 0,01.

(1) Las dimensiones del aparato estaban reducidas á la cuarta parte. La razon de este cambio consiste en que, segun lo hicieron notar los observadores, para duraciones iguales de oscilacion, la desviacion independiente del peso de las bolas, está en razon de las dimensiones homólogas (para aparatos geométricamente semejantes.) Esta consideracion les ha permitido reducir el peso de las masas atrayentes, teniendo dicha reduccion la ventaja de haberse podido comprobar la ley de atraccion de Newton á distancias distintas.

IV

CONSECUENCIAS DE LAS MEDIDAS DE LA DENSIDAD DE LA TIERRA

Así pues, la masa de la Tierra es igual á un poco más de cinco veces y media la masa de un globo de agua de la misma dimension. Puede pues valuarse, por ejemplo, en kilógramos, ó en toneladas de 1000 kilógramos, pero teniendo muy en cuenta lo que puede entenderse por peso de la Tierra. Sabemos perfectamente lo que entendemos por el peso de una tonelada de 1000 kilógramos; es el que resultaria pesando en el vacío un metro cúbico de agua pura á 4 grados, efectuando la pesada á la latitud de Paris y al nivel del mar.

Supongamos pues que sea posible pesar sucesivamente, en tales condiciones y *partes por partes* toda la materia que compone el globo terráqueo, y sumando todos estos pesos parciales, el resultado que se obtendria pasaria de 6,000,000.000,000 de toneladas de 1000 kilógramos, cifra enorme, que sólo tiene interés como curiosidad y únicamente propia para poner en relieve la inmensidad de la masa del globo.

Una consecuencia más interesante de la averiguacion de la densidad media de la Tierra es la relativa á la constitucion de sus capas interiores. Conócese directamente la de las capas accesibles á la observacion, y los físicos y geólogos, despues de examinar los materiales constitutivos de la corteza, piensan que no se dista mucho de la verdad considerando la densidad de estos materiales dos veces y media ó dos y dos tercios igual á la del agua. Siendo 5,56 la densidad media de la Tierra, es evidente que la de las capas internas y la del núcleo central

excede de la media. Este resultado confirma las previsiones que se podian formar en virtud de otra clase de consideraciones. Si nos remontamos á las épocas en que el globo terráqueo entero se hallaba en estado flúido, podemos admitir que las diferentes sustancias que componian su masa debieron seguir, en cuanto á su equilibrio, la ley de los líquidos superpuestos, los más densos de los cuales están siempre debajo de los ménos densos: los materiales más pesados formaron el núcleo central, y las capas exteriores han resultado ser las más ligeras.

Pero hay otra razon que vendria á justificar el aumento de densidad de las capas cen-

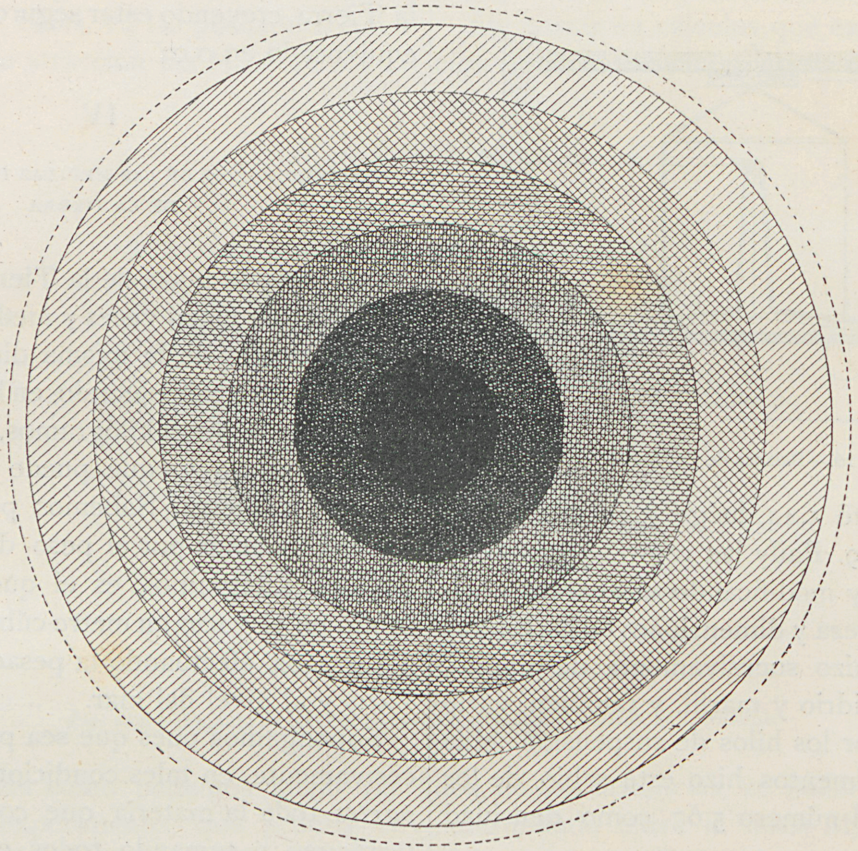


Fig. 117. — Densidades comparadas de las capas terrestres, segun la ley de Legendre

trales. Aun suponiendo que el globo terráqueo se compusiera de materias específicamente las mismas, como la presion ejercida por unas capas sobre otras iba creciendo de la superficie al centro, debió resultar de aquí una compresion ó disminucion de volúmen, es decir, un aumento de densidad. Así pues, este aumento era inevitable para las capas y el núcleo interiores terrestres, al ménos hasta cierto límite, que depende de la ley de variacion de la compresibilidad con la presion, áun para materiales primitivamente homogéneos.

Sabíase ya, tanto por la medicion de los grados de los meridianos como por las observaciones del péndulo, que la hipótesis de la homogeneidad de la Tierra era incompatible con los hechos; pues el aplanamiento del globo hubiera sido mucho mayor de lo indicado á la vez por las mediciones directas y por la teoría. La determinacion de la densidad media comparada con la de las capas exteriores es una confirmacion de tan importante resultado.

Pero si está probado que las capas del elipsoide terrestre tienen densidades crecientes desde la superficie al centro, en cambio continúa ignorada la ley en cuya virtud aumentan dichas densidades. El único medio de abordar una cuestion tan compleja consiste en hacer hipótesis, someterlas al cálculo y comprobar prácticamente algunas de sus consecuencias. Clairaut supuso en el siglo pasado que la densidad de las capas sucesivas disminuia en la

misma relacion con que aumenta su distancia al centro. Legendre opinó que la densidad decrece con ménos rapidez de la que esta distancia aumenta, ó lo que es lo mismo, que á partir de la superficie crece al pronto rápidamente y luégo cada vez ménos hasta que cerca del centro, el aumento es nulo. Esta hipótesis está de acuerdo con lo que se sabe de la compresibilidad de los sólidos y de los líquidos; esto es, que los cuerpos en cualquiera de estos estados, oponen tanta mayor resistencia á la compresion cuanto más comprimidos están.

Parece pues que si el aumento de densidad de las capas interiores tiene una explicacion satisfactoria en la fluidez primitiva de la Tierra, en el trasporte de las materias más densas al centro, así como en el efecto natural de la compresion ejercida por las capas superiores sobre las más bajas, esta última causa puede bastar. Laplace ha estudiado la hipótesis de que la composicion del núcleo terrestre fuese químicamente homogénea, y ha deducido que la compresion bastaba para explicar el aumento de densidad desde la superficie al centro.

¿Es así? ¿El núcleo terrestre es químicamente homogéneo, ó debemos creer que se compone, por ejemplo, de masas minerales en fusion?

La ley de Legendre sobre el aumento de las densidades da los resultados siguientes (figura 117):

Representando por 1 la densidad en el centro y por 1 el radio de la Tierra, hé aquí cuáles serian las densidades de las capas á varias distancias del centro:

Distancias al centro	Densidades relativas	Densidades con relacion al agua
1,0	0,25	2,6
0,8	0,46	4,78
0,6	0,67	6,97
0,4	0,84	8,78
0,2	0,96	9,98
0,0	1,00	10,4

La densidad de la superficie, la densidad media y la del centro deberán estar, poco más ó ménos, en la relacion de los números 1, 2 y 4, en progresion geométrica, y las capas de densidad igual á la densidad media de la Tierra deberán hallarse á la cuarta parte del radio próximamente á partir de la superficie y á las tres cuartas partes de la distancia de ésta al centro (1).

CAPÍTULO III

MOVIMIENTO DE LOS PROYECTILES

I

MOVIMIENTO DE LOS PROYECTILES SOMETIDOS Á LA ACCION DE LA GRAVEDAD

¿Cuál es la accion de la gravedad en los cuerpos puestos en movimiento?

Cuando se dispara un proyectil al aire, mediante un impulso que se puede considerar como instantáneo, afectan el movimiento de aquel varias influencias ó fuerzas, cuyos efectos hay que conocer separadamente para resolver la cuestion tal como la hemos planteado: existe la *fuerza de impulso*, que por sí sola daria al cuerpo un movimiento rectilíneo, uniforme, indefinido, es decir, una velocidad constante;

(1) Plana estima tan sólo en 1,83 la densidad de las capas superiores con relacion á la del agua. Sin duda tiene en cuenta la masa de las aguas del Océano que disminuye considerablemente la densidad de la costra terrestre, si no se atribuye á esta costra más que un espesor igual al de las profundidades exploradas. En cuanto á la densidad del centro de la Tierra, Plana la hace llegar á 16,27, es decir, á una cantidad de 8 á 9 veces mayor que la densidad superficial.

Cuando se habla de la densidad media de la Tierra, se sobreentiende que no se trata sino de la parte sólida y líquida del globo, y que se hace abstraccion de la envolvente aérea de la atmósfera. Parécenos sin embargo que se podria tener legítimamente en cuenta el volúmen y la masa de esta cubierta gaseosa, en cuyo caso la densidad media del globo terráqueo quedaria bastante reducida. Hé aquí el resultado probable que en tal caso se obtendria:

Podemos considerar la altura de la atmósfera igual á la 25.ª parte del radio terrestre, ó sea de unos 250 kilómetros. El peso viene á ser igual á la 1.000,000.ª parte del de la parte sólida. En tales condiciones, siendo el volúmen total igual al volúmen sólido más $1/8$ (1,125), la densidad media seria á la densidad cuyo valor acabamos de indicar como 1.000,001 es á 1.125,000. El cálculo da entónces para la densidad media así definida el número 4,94.

Así pues, la agregacion de la atmósfera reduciria la densidad en 5,56, próximamente la 9.ª parte de su valor.

luégo la *gravedad*, cuyas leyes hemos estudiado, cuando el móvil se halla en el vacío; y además la *resistencia del aire*, que se combina con la gravedad para modificar la velocidad inicial. Pero no es esto todo: la Tierra, en cuya superficie ocurre el fenómeno, no está en reposo; tiene dos movimientos, el de *traslacion en el espacio* y el de *rotacion uniforme* sobre su eje; estos movimientos engendran fuerzas aparentes, la de arrastre y la centrífuga, que influirán en la marcha del móvil, y cuyo efecto hay que calcular tambien, si se quiere resolver completamente la cuestion.

Esta es en realidad un problema de mecánica, del cual no deberíamos ocuparnos aquí, si su solucion no nos hiciera comprender por una serie de consecuencias cómo ejerce su accion más allá de nuestro globo la gravedad, esa fuerza cuyos efectos nos son tan conocidos y familiares, y cómo no es más que un caso particular de la fuerza que causa todos los movimientos de los cuerpos celestes.

Volvamos á nuestro móvil. Supongamos ante todo que se le ha disparado en el vacío y en una direccion rigurosamente vertical, ya sea de abajo arriba, ó viceversa.

Si se le dispara de abajo arriba, su velocidad inicial resultará disminuida á cada instante por la que la gravedad le imprime en sentido contrario, y claro está que esta velocidad inicial quedará anulada tan luégo como el tiempo de la ascension sea tal, que haya igualdad entre dicha velocidad y la adquirida por efecto de la gravedad. Un cálculo muy sencillo (1) demuestra que el tiempo de la ascension debe de ser igual á la velocidad inicial dividida por la intensidad de la gravedad en el punto en que se verifica el experimento. Al llegar el cuerpo al término de su trayectoria vertical, caerá únicamente por la accion de la gravedad, siendo fácil demostrar que el tiempo que invertirá en recorrer en sentido inverso el mismo camino, será exactamente igual á la duracion de la ascension.

Por lo demás, este es un caso imaginario, puesto que el movimiento de los proyectiles siempre tiene efecto en el aire. El flúido en que se mueven opone en realidad una resistencia que no es fácil calcular con todo rigor, dado que no se conoce la ley exacta de las variaciones de esta resistencia con la velocidad (2). La influencia de la resistencia indicada causará sin duda cierta disminucion en la velocidad de ascension así como en la de la caida, y tambien en la altura vertical á que llegará el cuerpo.

Pero no es esto todo. Hemos visto ya que, á causa de la rotacion de la Tierra y de la fuerza centrífuga que de ella resulta, la caida de los graves por efecto de la gravedad no se efectúa en rigor siguiendo la vertical, sino que todo cuerpo que cae se desvia un tanto al este. Fácilmente se comprende que cuando el cuerpo se eleva sucede lo contrario, esto es, se desvia al oeste; al llegar al punto culminante se halla al oeste de la vertical, es decir, en la vertical de un punto que está al occidente del de partida; pero al caer no habrá lugar á que se desvie con relacion á esta nueva vertical. En resúmen, se desviará al oeste. En todo este raciocinio se hace abstraccion de la resistencia del aire, que dista mucho de ser despreciable; y si se tratase de hacer un experimento positivo, claro está que no se podria comprobar rigurosamente el resultado que indica la teoría. Así lo consigna en las líneas siguientes M. J. Bertrand, uno de nuestros ilustres geómetras contemporáneos:

«Segun parece, Varignon indicó por primera vez, en 1707, la contradiccion geométrica de las leyes de Galileo sobre la caida de los cuerpos con la hipótesis de la rotacion de la Tierra y la de una gravedad constante. Limítase á demostrar que la reunion de estas tres hipótesis implica contradiccion, sin atreverse á decidir la que debe modificarse, y sin indicar siquiera sus conjeturas; pero es de creer que si se hubiera

(1) La fórmula es tan sencilla que la trascribiremos aquí. Llamando a á la velocidad inicial, t al tiempo en segundos, v á la velocidad de ascension, y h á la altura de ascension, tendremos

$$v = a - gt, \qquad h = at - \frac{gt}{2}$$

Para $v = 0$, $t = a$. Supongamos que el móvil tiene en Paris una velocidad de impulso de 9,81 metros: subirá durante un segundo y llegará tan sólo á $4^m,90$ de altura. Con una velocidad décuple, de $98^m,10$, la ascension durará 10 segundos y el cuerpo se elevará 490 metros. Todos estos números suponen que la ascension se verifica en el vacío.

(2) Segun las hipótesis que se han comprobado prácticamente, la resistencia que opone el aire al movimiento de los proyectiles depende á la vez del peso del móvil, de la superficie de su seccion trasversal y de su velocidad; crece un poco más de prisa que el cuadrado de la velocidad; el exceso procederá en parte del aumento de densidad del aire empujado por el proyectil.

decidido, no habria tenido buena eleccion: en su obra sobre la causa de la gravedad se presenta poco dispuesto á tratar de semejantes cuestiones. Vése en la portada una viñeta muy elegante representando dos personajes, un militar y un religioso, junto á un cañon apuntando al zenit; miran al aire como siguiendo con la vista la bala que se acaba de disparar. En el grabado se leen estas palabras: «¿Volverá á caer?» El religioso es el célebre P. Mersenne, y su compañero M. Petit, intendente de fortificaciones. Muchas veces repitieron este peligroso experimento, y como no fueron bastante diestros para hacer que la bala les cayera en la cabeza, creyeron poder deducir que se habria quedado en el aire, donde sin duda permaneceria mucho tiempo.» Varignon no contradice el hecho, pero se manifiesta asombrado de él: «Una bala suspendida sobre nuestras cabezas, dice, es á la verdad cosa sorprendente. Los dos experimentadores, si es permitido llamarlos así, dieron cuenta á Descartes de sus pruebas y del resultado obtenido. Descartes no vió en aquel caso tenido por exacto, más que una confirmacion de sus sutiles lucubraciones sobre la gravedad.

»Más de un siglo despues, d'Alembert, que analizó perfectamente el fenómeno, calculó la desviacion de la bala, haciendo abstraccion de la resistencia del aire. Un proyectil, disparado verticalmente de abajo arriba, con una velocidad de 1,800 piés por segundo, debe desviarse al este y caer á 600 piés de su punto de partida; en concepto de aquel sabio, si Mersenne y Petit no pudieron averiguar el paradero de los que dispararon fué por haberlos buscado demasiado cerca. Pero esta explicacion no es admisible; la resistencia del aire, desdeñada por d'Alembert, ejerce grandísima influencia. Segun los cálculos de Poisson, una bala de fusil, disparada con una velocidad de 400 metros por segundo, y que caeria en el vacío á 50 metros de su punto de partida, no se desviará en el aire más que unos cuantos centímetros. Por consiguiente, el experimento de Mersenne tan sólo prueba la dificultad de disparar una bala de cañon en una direccion rigurosamente vertical; la de un fusil seria más fácil de dirigir; pero el error de la puntería, unido á la influencia de las corrientes de aire, produciria sin duda desviaciones mucho mayores que las que se necesita medir.

»Segun Poisson, las desviaciones son siempre muy pequeñas, y para comprobarlas, seria preciso hacer prolijas pruebas, casi siempre irrealizables.

»En la hipótesis, irrealizable por supuesto, de que el aire no se opusiera al movimiento, de que la atmósfera no existiera, la distancia á que se alejaria de la Tierra un móvil disparado verticalmente, iria creciendo indefinidamente á medida que creciera la velocidad inicial. Más aún: al pasar de cierto límite, el cuerpo se alejaria para no volver ya: esto es lo que sucederia si la velocidad inicial de impulso excediera de unos 11 kilómetros por segundo. Este caso singular no tiene aplicacion en nuestro globo, porque existe la resistencia del aire y su accion crece rápidamente con la velocidad misma. Pero si es cierto que la Luna está absolutamente privada de atmósfera, ó que tiene una de extraordinaria tenuidad, como las observaciones permiten creerlo, un proyectil disparado en su superficie con la rapidez conveniente, podria abandonar á nuestro satélite; y si además su direccion fuese tal que lo atrajese la gravedad terrestre, podria venir á caer en la superficie de la Tierra ó al ménos á dar vueltas alrededor de nuestro globo como un nuevo satélite.

»Esta cuestion se ha debatido con motivo de los meteoritos, de los bólidos que de vez en cuando caen en la Tierra. Se ha pensado que estas caidas de minerales podian proceder de la expulsion de las materias lanzadas por las erupciones de los volcanes de la Luna. «Laplace, Biot y Poisson han calculado la velocidad con que los volcanes lunares debian despedir semejantes masas para que pudieran llegar á la esfera de atraccion de nuestro satélite, traspasarla, y obedeciendo á la influencia de la gravedad terrestre, caer en nuestro planeta. Esta velocidad no tendria nada de extraordinaria, sobre todo dada la escasa intensidad de la gravedad en la superficie de la Luna, así como la carencia de toda atmósfera resistente; no pasaria de 2,500 metros por segundo. Pero la objecion decisiva, al ménos para la mayor parte, cuando no para la totalidad de los meteoritos observados, es siempre la enorme velocidad con que han penetrado en nuestra atmósfera.» *(El Cielo.)*

II

MOVIMIENTO DE LOS PROYECTILES DISPARADOS EN DIRECCION DISTINTA DE LA VERTICAL

Acabamos de considerar el movimiento de un proyectil disparado en sentido vertical. Veamos ahora cómo obra la gravedad para modificar este movimiento cuando el impulso inicial tiene distinta direccion.

Supongamos ante todo que se dispara el proyectil en una direccion rigurosamente horizontal A H (fig. 118), y que no tiene que vencer la resistencia del aire. Fácilmente se ve que su trayectoria A M será el arco de una parábola cuyo vértice está en el punto de partida y su concavidad dirigida hácia el suelo. En virtud de la inercia, el móvil describiria, en los segundos sucesivos, líneas rectas iguales, A*a*, *ab*, *bc*, etcétera, si no interviniese la gravedad. Por otra parte, caeria bajo la accion de esta fuerza en sentido de la vertical y recorriendo espacios proporcionales á los cuadrados de los tiempos. La composicion de estos dos movimientos dará lugar á una trayectoria Am_1, m_2, m_3..... M, que, segun lo demuestra el análisis, es una parábola.

Refiriéndose al experimento hecho con la máquina Morin, es fácil conocer que los dos casos son enteramente semejantes. En dicha máquina, el cilindro se mueve con movimiento

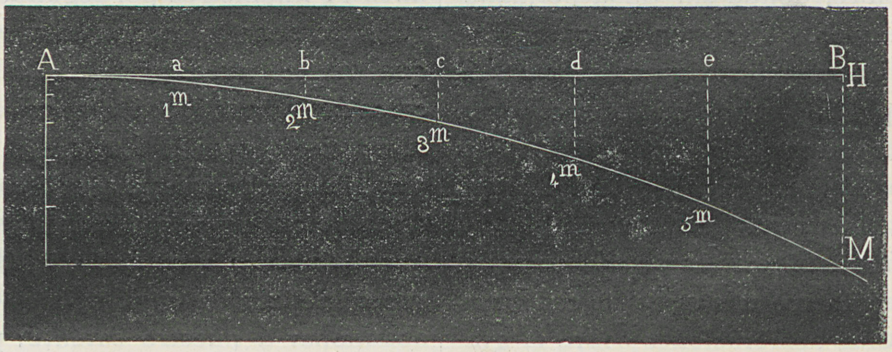


Fig. 118.—Movimiento parabólico de un proyectil lanzado en direccion horizontal

uniforme en sentido horizontal; pero claro está que se podria suponer inmóvil al cilindro y sustituir á su movimiento otro movimiento igual y opuesto, en sentido horizontal, del cuerpo que cae.

La trayectoria descrita será la misma en ambos casos, si la velocidad de impulso del proyectil es la misma que la velocidad uniforme de un punto del cilindro.

Compruébase prácticamente de otro modo la forma parabólica de la trayectoria de un móvil lanzado horizontalmente con velocidades diferentes.

Por los diversos puntos de una ranura curva AB (fig. 119) se dejan caer bolitas, que llegan al punto más bajo con velocidades horizontales tanto mayores cuanto más alto está en la ranura el punto de partida. En un cuadro vertical situado en el plano de la trayectoria, hay trazados varios arcos de parábola, en el cual se han fijado algunas anillas: al pasar las bolitas sucesivamente por el hueco de las anillas que pertenecen á una misma parábola, indican tostcamente, por esto mismo, que su trayectoria tiene una forma parabólica.

Cuando se dispara el proyectil en direccion oblicua al horizonte, como AB, AC, AD..... (fig. 120), las trayectorias que describe, abstraccion hecha de la velocidad del aire, son tambien parábolas cuya forma y dimensiones dependen á la vez de la velocidad inicial y de la inclinacion de la direccion del tiro. Empieza por elevarse hasta un punto culminante en que la direccion de su movimiento resulta horizontal, y luégo baja describiendo una curva simétrica á la descrita en su movimiento ascendente. Dicho punto culminante N, N', N'' es el vértice de la parábola trazada por el proyectil en su marcha.

Demuéstrase en mecánica que para una misma velocidad inicial, las distancias AP, AP', AP'' en que el proyectil corta la horizontal del punto de partida (á lo que se da el nombre de *amplitud del tiro*) varian con la inclinacion, y que esta amplitud llega á su máximum cuando el ángulo formado por la línea de tiro con el horizonte

es de 45° (1); tal es en el grabado la distancia AP', formando la direccion AC con el horizonte un ángulo igual á medio ángulo recto. La amplitud del tiro va aumentando al principio, cuando la inclinacion aumenta á partir de o°, y esto hasta 45°; desde aquí, disminuye hasta ser nula para una direccion vertical.

En todo esto se prescinde, como hemos dicho, de la resistencia del aire; pero si se tiene en cuenta este elemento, la trayectoria no tiene ya la misma forma; las dos partes AC, CB (fig. 121) dejan de ser simétricas relativamente al punto culminante, y el proyectil se acerca rápidamente á la vertical al caer, como lo demuestra dicha figura.

Añadamos por último que la rotacion de la Tierra ejerce cierta influencia en la trayectoria y produce una desviacion lateral, de suerte que el proyectil se aparta del plano de la línea de tiro. Así es que una bala de cañon disparada

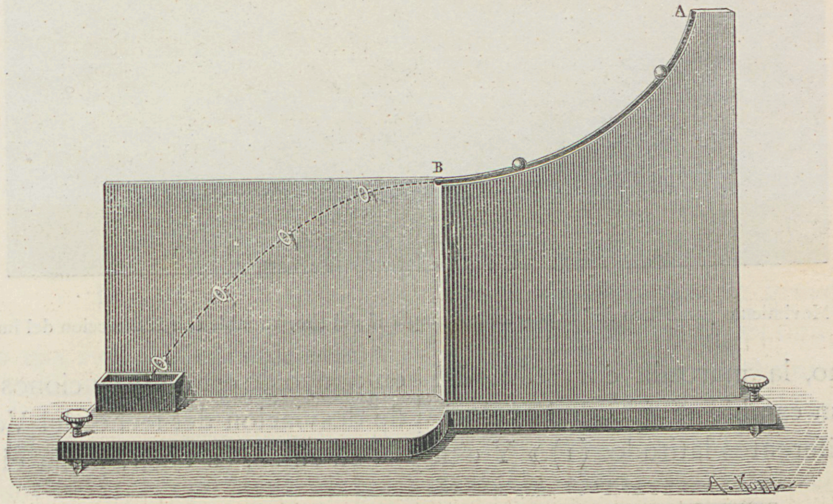


Fig. 119.—Comprobacion práctica del movimiento parabólico de los proyectiles

en direccion horizontal, sin movimiento giratorio alrededor de su eje, sufre una desviacion notable á la derecha, por efecto de la fuerza centrífuga compuesta. Como todos los cuerpos en movimiento experimentan la influencia de esta fuerza, no están exentas de ella las corrientes de agua, y la masa líquida de un rio se aglomera más en el hemisferio norte en la orilla derecha que en la izquierda; áun cuando la velocidad sea bastante escasa, como la accion depende de la magnitud de la masa en movimiento, es decir, del caudal del rio, los resultados distan mucho de ser insignificantes en las avenidas. En el hemisferio sur esta desviacion ocurre á la izquierda. Ofrece interés el citar las observaciones positivas de un hecho mecánico que procede del movimiento de rotacion de nuestro globo, y que demuestra así la realidad de esta rotacion. Tomaremos algunos ejemplos de nuestro eminente geógrafo Elíseo Reclus.

«La dificultad está únicamente en escoger, dice en su amena obra *La Tierra*, para citar ejemplos de rios que modifican gradualmente su curso en el sentido previsto por la teoría. Al sur del ecuador tenemos los afluentes del gigantesco Rio de la Plata, que despues de nivelar al oeste la extension de las Pampas, corroen sin cesar su orilla izquierda. En el hemisferio norte, el Eufrates, que procura desembocar enteramente en el lecho del Hindiah, á la derecha de su propio curso; el Ganges, que abandona la ciudad de Gur, en medio de los bosques, y que se inclina á 7 ú 8 kilómetros al oeste de su delta; el Indo, que socava las colinas guijarrosas de su orilla occidental para llevar su delta 1000 kilómetros más al oeste; el Nilo, que se separa de su antiguo lecho en el desierto de Libia para dirigirse hácia la cordillera arábiga. En Europa tenemos el Gironda, el Loire, el Elba, que minan la base de las escarpaduras de su orilla derecha; y el Vístula que hace más profunda su desembocadura oriental á expensas de la de la izquierda. Los geógrafos han advertido además en el curso del Rhin, del Danubio y del Volga fenómenos análogos producidos por la misma causa.» «En la Rusia de Europa

(1) La amplitud es entónces precisamente igual al doble de la altura á que se eleva el proyectil cuando se le dispara verticalmente.

y de Asia, sigue diciendo el mismo autor, es donde la desviacion normal de los rios se presta especialmente á los estudios más interesantes. Allí se reunen en efecto las condiciones más á propósito para la invasion gradual de las aguas en su orilla derecha; longitud considerable, poderosas masas líquidas que pueden allanar muchos obstáculos, enormes avenidas que aumentan periódicamente la fuerza de erosion de la corriente, peñas compuestas de un suelo friable, y por último, la marcada curvatura del globo, causa de un cambio rápido de la velocidad angular en diferentes latitudes (1).» Y cita en apoyo de estas afirmaciones los movimientos de desviacion del lecho del Volga á la derecha de su curso, es decir, hácia el oeste. En Siberia, las corrientes se desvian en la misma direccion más rápidamente todavía.

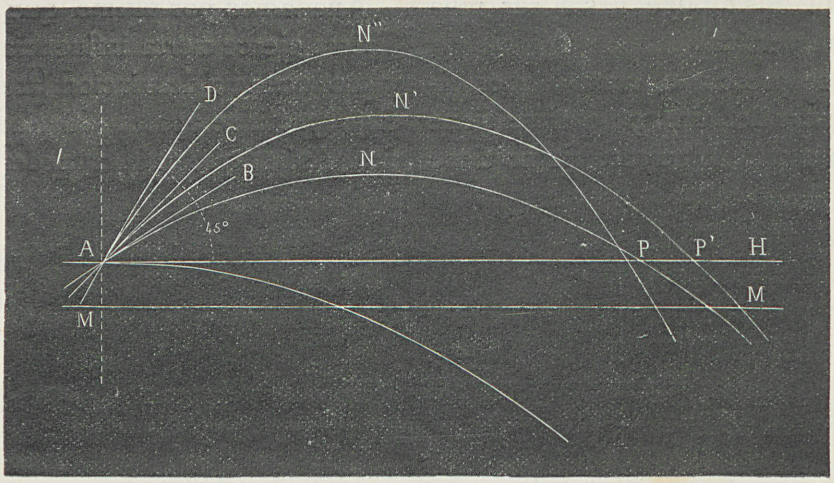


Fig. 120.—Movimiento parabólico de los proyectiles: amplitud del tiro, variable con la direccion del impulso inicial

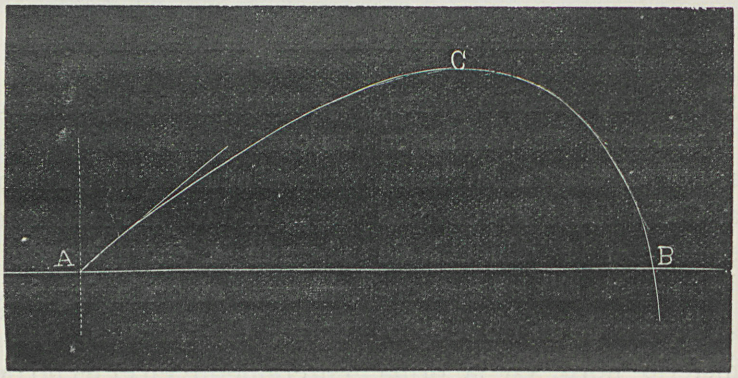


Fig. 121.—Curva descrita por un proyectil cuando se tiene en cuenta la resistencia del aire

Esta ley de desviacion es asimismo aplicable á las corrientes marinas, siendo uno de sus más sorprendentes testimonios el Gulf-Stream, que se desvia al este. Finalmente, ya veremos más adelante que una desviacion parecida es la causa de la direccion que siguen los vientos alisios así al norte como al sur del ecuador.

Aunque un cuerpo se halle en un reposo relativo en la superficie de la Tierra, no por ello deja de estar sometido á la fuerza centrífuga desarrollada por la rotacion comun, y ya hemos visto que de aquí resulta una disminucion en la fuerza de la gravedad y por consiguiente en el peso del cuerpo. Esta disminucion llega á su máximum en el ecuador, porque la fuerza cen-

(1) La reaccion lateral de que se trata es una fuerza proporcional á la masa puesta en movimiento, á su velocidad de traslacion y al seno de la latitud. Estos son los tres factores que influyen en los fenómenos en cuestion; no creemos que la longitud tenga ni pueda tener influencia, por lo que respecta á los rios, sino en cuanto su caudal crezca con la longitud de su curso; pero en este caso lo que influye es la masa de las aguas y su velocidad. La curvatura de que habla Reclus es una expresion falsa ó por lo ménos impropia, pues aquella es más marcada en las latitudes bajas que en las altas. El ángulo que forma el horizonte con el eje de rotacion es el que crece del ecuador á los polos, haciendo tanto más poderosa la accion de la fuerza centrífuga compuesta, cuanta mayor es la distancia entre éstos.

trífuga tiene en él su mayor valor. El cálculo demuestra que este valor es la 289.ª parte de la fuerza de atraccion terrestre. Por otra parte, como la fuerza centrífuga crece como el cuadrado de la velocidad angular de rotacion, resulta de aquí con evidencia que si el movimiento de la Tierra fuese 17 veces más rápido, la fuerza centrífuga seria en el ecuador 17 × 17, ó 289 veces más considerable: seria igual á la atraccion terrestre y por consiguiente los cuerpos no pesarian nada. Si la velocidad de rotacion fuese todavía mayor, predominaria la fuerza centrífuga, y todos los cuerpos que no estuvieran sujetos al suelo irian á parar al espacio; se separarian de nuestro globo describiendo una curva cuyos primeros elementos serian verticales. Luégo veremos cómo se hace uso de esta hipótesis para averiguar el límite extremo de la atmósfera terrestre, y por consiguiente, el de la atmósfera de cualquier cuerpo celeste.

CAPÍTULO IV

LA GRAVITACION UNIVERSAL

I

¿ES LA GRAVEDAD UNA FUERZA EXCLUSIVAMENTE TERRESTRE?

La gravedad, tal como acabamos de estudiarla en sus fenómenos y en sus leyes, es una fuerza que hasta el presente parece inherente á la Tierra; su direccion siempre encaminada, ya que no á un punto determinado que debe ser el centro de nuestro globo, al ménos á regiones muy próximas á este centro; su accion, que no tan sólo comprime de continuo todas las capas terrestres unas sobre otras y precipita los cuerpos abandonados á sí mismos en el aire ó en el vacío, sino que tambien atrae á la superficie del suelo los móviles lanzados en cualquier direccion, y se ejerce en todas las profundidades accesibles del propio modo que en todas las alturas de la atmósfera; sus variaciones de intensidad, que se patentizan cuando la latitud cambia, haciendo así ostensibles las variaciones mismas de la forma de la Tierra ó los accidentes de su superficie, y que dependen, como se ha visto, de la distancia al centro ó al eje de rotacion; en una palabra, todo cuanto hasta ahora conocemos acerca de la gravedad, parece presentárnosla como fuerza eminentemente terrestre. Se ha visto que todos los cuerpos son pesados y que si no cambian de posicion, si su latitud y la altitud del lugar en que se encuentran son invariables, su peso tampoco varía.

Sabemos pues que, la gravedad, circunscrita á estos últimos límites, es una fuerza constante, y podemos añadir que es universal, por cuanto no hay en la Tierra un cuerpo sólido ó flúido, una partícula ni un átomo de materia que no sientan su influencia, tanto si están en reposo como si se mueven.

Ahora debemos ir más léjos; ahora debemos pasar desde la Tierra, donde hemos permanecido confinados y donde se han hecho hasta aquí todas las observaciones, todos los experimentos de que nos hemos ocupado, á las regiones celestes, á los cuerpos que se mueven en las profundidades del cielo. No ignoramos que la Tierra misma recorre esos espacios, y en realidad podria decirse que los explora y los conoce, que trasporta á ellos por doquiera esa fuerza de gravedad que le es propia. Pero lo que se ha ignorado por espacio de mucho tiempo, más áun, lo que se ha venido negando, bajo el imperio de no sé qué ideas de vana metafísica, es que los cuerpos celestes están sujetos como los cuerpos terrestres á dicha fuerza. La Luna, que acompaña á la Tierra en su movimiento anual de traslacion, ¿pesa hácia nuestro globo? El Sol, los planetas y todos los astros son, como el nuestro, asiento de fuerzas análogas á la gravedad terrestre, y si es así, todas esas fuerzas diseminadas por el espacio á toda distancia, ¿ejercen alguna reaccion entre sí? Finalmente, si estas acciones y reacciones son reales, ¿cuál es su ley comun?

Estas cuestiones, que á nadie se le habia ocurrido siquiera enunciar ántes de la época de Galileo, y cuya gran importancia científica y filosófica no es posible desconocer, están hoy resueltas gracias al genio de Newton y á los admirables trabajos de los geómetras y astrónomos que de dos siglos á esta parte vienen siguiendo el camino trazado por aquel grande hombre. Procuraremos exponer con su mismo encadenamiento esa serie de descubrimientos que, al enlazar la Tierra con el cielo, los fenómenos terrestres con los observados en las profundidades del espacio, han hecho de la física terrestre y de la celeste una sola y misma ciencia.

II

DESCUBRIMIENTOS ASTRONÓMICOS DE COPÉRNICO. EL VERDADERO SISTEMA DEL MUNDO. — LEYES DE KEPLERO

Acabamos de decir que ni siquiera se sospechaban los problemas que quedan formulados ántes de la época de Galileo, es decir, ántes de la introduccion del método experimental en el estudio de la física. Añadamos ahora que su solucion exigia y suponia una revolucion inmensa, la cual ocurrió por fortuna en astronomía, merced al impulso de los Copérnico y de los Keplero. Para descubrir el vínculo físico que enlazaba todos los astros, la fuerza que dirigia los movimientos de los cuerpos del sistema solar, era preciso conocer las posiciones relativas verdaderas y los movimientos reales de todos estos cuerpos; era forzoso descubrir las leyes de estos movimientos. Copérnico habia demostrado en su inmortal obra de las *Revoluciones celestes*, publicada en 1543, la realidad del doble movimiento de la Tierra, ó sea el de rotacion sobre su eje y el de traslacion alrededor del Sol, y haciendo extensiva á todos los planetas esta verdad que algunos filósofos de la antigüedad habian vislumbrado vagamente, fundó sobre sólidos cimientos el verdadero sistema del mundo. El Sol es el centro relativamente inmóvil de todos los movimientos planetarios; en torno suyo y en el mismo sentido circulan Mercurio y Vénus, la Tierra y Marte, Júpiter y Saturno, á distancias y en planos diferentes, y en períodos y con velocidades desiguales, pero constantes; la misma Luna no es más que un satélite de la Tierra, como los satélites que se descubrieron posteriormente y que acompañan á muchos de los planetas á la sazon conocidos.

Pero si Copérnico supo asignar al Sol, á los planetas y á la Tierra su verdadero papel, si sustituyó la sencilla realidad á las hipótesis complicadas de los antiguos astrónomos, no pudo columbrar más que una parte de la verdad. Los antiguos, además de considerar á la Tierra como centro del mundo, basaban todas sus explicaciones de los movimientos celestes

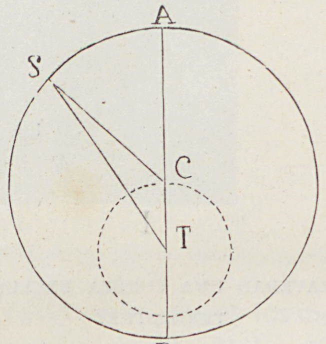


Fig. 122. —Movimiento del Sol alrededor de la Tierra, segun la hipótesis de Hiparco

en la falsa idea de que los astros no pueden describir más curva que el círculo, al que consideraban como la curva por excelencia. Admitian además que este movimiento circular era necesariamente uniforme. Estas tres hipótesis falsas, es decir, la de la inmovilidad de la Tierra, la de la forma circular de las órbitas y la de la uniformidad del movimiento predominaban en todo su sistema astronómico (1). Pero como la naturaleza no se prestaba á estas miras *à priori*, menester era explicar las anomalías que la observacion indicaba. Era preciso dar con la causa que hace que los planetas se muevan tan pronto lenta como rápidamente, la de que en sus revoluciones á veces parezcan estacionados, y por último, la de que, al cambiar la direccion de su

(1) Para explicar el movimiento aparente del Sol, la hipótesis era bastante sencilla. Hé aquí cuál era la adoptada por Hiparco. El Sol describia alrededor de la Tierra un círculo de radio CS, de movimiento uniforme, de suerte que el astro, visto desde el centro C, habria tenido un movimiento angular igual (fig. 122). Pero la Tierra está en T; y por lo tanto, el movimiento del Sol parece variable para un observador situado en aquella. Hiparco explicaba así, en cierto modo, las observaciones: suponiendo que la Tierra estaba situada excéntricamente con relacion á la órbita aparente del Sol (órbita que se ha tenido por real hasta Copérnico) suplia la falta de excentricidad de la curva misma.

marcha, retrogradan, se detienen de nuevo y emprenden otra vez su movimiento ordinario. Dada la hipótesis del movimiento uniforme y circular alrededor de la Tierra, esta explicacion no era fácil; pero, áun sin desecharla, los astrónomos habian llegado á explicar tales irregularidades. Suponian que el planeta P (fig. 123) se movia alrededor de un círculo cuyo centro C se movia á su vez en torno de otro círculo, el cual describia por su centro C' una nueva circunferencia. Este era el sistema de los *epiciclos*. Gra-

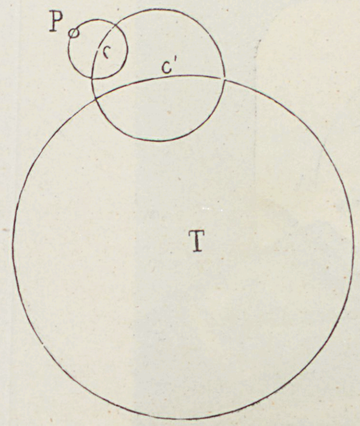


Fig. 123. — Epiciclos de los antiguos. Movimiento de un planeta alrededor de la Tierra

cias á estas suposiciones ingeniosas, pero complicadas, se conseguia explicar mal ó bien las apariencias. Mas á medida que se perfeccionaban los medios de observacion, que se descubrian nuevas desigualdades, complicábase el sistema, y los círculos se enmarañaban más y más. Biot caracteriza perfectamente en pocas líneas el modo cómo los antiguos creyeron resolver la cuestion de los movimientos de los cuerpos celestes, y las dificultades que les oponia la solucion adoptada.

«El problema de la astronomía planetaria, dice, consistia en suponer que el Sol, la Luna y los planetas se movian uniformemente en torno de varios círculos colocados de tal suerte en el cielo, que las posiciones sucesivas de dichos cuerpos, vistos desde la Tierra, concordasen con las desviaciones angulares que en ellos se observan. Tal fué el único objeto de los astrónomos griegos. No les era preciso, como á nosotros, conocer tambien las condiciones que resultan de las variaciones de distancia, pues no poseian instrumentos ópticos bastante sutiles para deducirlas de la medicion de los diámetros aparentes con la seguridad indispensable para poder hacer uso de ellos. Por falta de este dato, sus sistemas de órbitas no fueron más que ficciones matemáticas sin realidad, y se vieron obligados á complicarlas de tal modo para representar los detalles de las apariencias observables, que no debian tener otro valor, ni áun á sus ojos.»

Al colocar Copérnico las cosas en su órden verdadero, al destruir esas vanas suposiciones, suprimió de un solo golpe las dificultades crecientes de semejante sistema, ó por lo menos las más importantes. Así su teoría del movimiento de la Tierra dió la explicacion de las estaciones y retrogradaciones planetarias y de las variaciones aparentes de velocidad que las acompañan. Aunque disipara este primero y capital error, no quedaba dicho todo; porque el gran astrónomo, que no desechaba á pesar de todo la idea de un movimiento uniforme y circular, seguia suponiendo que los planetas y la Tierra misma describian círculos alrededor del Sol con velocidades desiguales entre sí, pero invariables, y como no sucede así, quedaban por explicar las desigualdades comprobadas por la observacion, para lo cual continuó Copérnico apelando á los epiciclos.

Necesario fué el genio de Keplero para extirpar estos postreros vestigios de los falsos sistemas. Aquel grande hombre desechó definitivamente el movimiento circular y uniforme, descubrió la verdadera forma de las órbitas, la ley de las variaciones de velocidad de los planetas en el curso de sus revoluciones, y asignó sus verdaderas relaciones á las dimensiones de dichas curvas, como consecuencia de las distancias de los astros al Sol y á la Tierra.

Keplero llegó á formular las leyes del movimiento elíptico estudiando los movimientos de Marte; las numerosas observaciones que su maestro Tycho-Brahe habia dejado acerca de este planeta, unidas á las suyas propias, le permitieron averiguar desde luégo que la órbita no es un círculo, sino una curva oval, uno de cuyos vértices está más inmediato al Sol que el vértice opuesto. Reconoció además que el movimiento de Marte en esta órbita no es uniforme, sino que se acelera á medida que disminuye la distancia de este planeta al Sol; que pasa

otra vez, aunque en sentido inverso, por las mismas variaciones de velocidad cuando se aleja del Sol, de suerte que el radio del planeta describe alrededor de este último astro sectores cuyas áreas varian proporcionalmente á los tiempos empleados en recorrerlas. La curva descrita de tal modo por Marte es una elipse, uno de cuyos focos lo ocupa el centro del Sol.

Keplero hizo extensivos á todos los planetas á la sazon conocidos y hasta á la Tierra misma, estas dos leyes importantes. Luégo, por un esfuerzo de su genio, llegó á descubrir la relacion de los elementos de las órbitas planetarias, es decir, la de los ejes mayores de estas curvas y la de las duraciones de sus revoluciones.

Estos descubrimientos son tan importantes que merecen que nos detengamos á considerarlos un momento, y que los formulemos rigurosamente. Hé aquí pues el enunciado exacto de las tres leyes á las cuales irá siempre gloriosamente unido el nombre de Keplero:

PRIMERA LEY.—*Cada planeta describe alrededor del Sol una curva plana que tiene la forma de una elipse* (1) *y el centro del Sol ocupa uno de sus focos.*

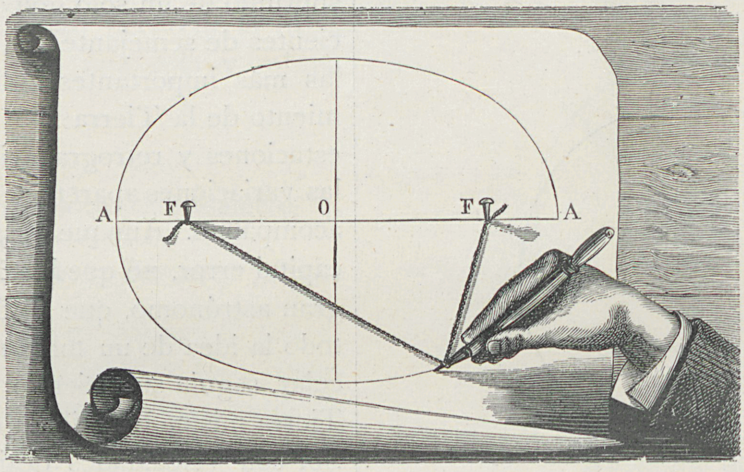


Fig. 124.—Método para trazar una elipse

Consideradas las diferentes órbitas planetarias como elipses invariables (más adelante veremos con qué restricciones) no son curvas semejantes; pues no tan sólo cambian las dimensiones de un planeta á otro, sino tambien la forma; en una palabra, las excentricidades de las elipses son muy desiguales. Véanse relativamente á los ocho planetas principales los valores de este elemento, expresados en partes del semi-eje mayor, ó de la distancia media de cada uno de ellos al Sol, y colocados en órden decreciente:

Mercurio.	0,2056048
Marte.	0,0932611
Saturno.	0,0560713
Júpiter..	0,0482519
Urano..	0,0463402
Neptuno.	0,0167701
La Tierra..	0,0089646
Vénus..	0,0068433

(1) Creemos oportuno entrar en algunos detalles acerca de la elipse, para la mejor inteligencia de aquellos de nuestros lectores que tal vez hayan olvidado la definicion de dicha curva. Tómese un hilo cuyas dos puntas se atarán á dos clavitos ó alfileres: hínquense estos en un papel, en una tabla, ó en la superficie plana en que se quiera trazar la línea curva de que se trata, pero cuidando de que la porcion de hilo comprendida entre los dos puntos fijos sea más larga que la distancia que media entre uno y otro. Hecho esto, se tesará el hilo con un lapicero lo suficiente para que sus dos porciones sean líneas rectas y de modo que la punta del lápiz pueda correr por el papel ó por la tabla: de este modo se trazará la mitad de una curva, que se completará fácilmente echando el hilo al otro lado de la línea recta que une los dos puntos fijos. La figura 124 representa la operacion que acabamos de describir y demuestra cuál es la forma de la curva obtenida.

Tal es la línea que se llama *elipse* en geometría.

Los dos puntos FF son los *focos* de la elipse, las dos porciones del hilo los *radios vectores* y la distancia O F del centro á uno de los focos, la *excentricidad.* Como la longitud del hilo permanece constante, la suma de los radios vectores es la misma en todos los puntos de la elipse. Esta propiedad sirve en geometría para definir dicha curva.

Fácilmente se ve que la curva es más prolongada en la direccion de la línea que une los focos: esta línea es su mayor diámetro y lleva el nombre de *eje mayor* de la elipse. El punto medio del eje mayor es el centro de la curva.

Si conservando los mismos focos, se emplean hilos más cortos para trazar dicha curva, resultarán elipses más alongadas. Lo contrario sucederá si se usan hilos más largos; en este caso las elipses trazadas se aproximarán cada vez más á la figura del *círculo,* aunque sin llegar jamás á ser rigurosamente *círculos.*

Por último, si teniendo el hilo la misma longitud, se acercan ó retiran los focos, resultarán las mismas diferencias de forma. En este caso, la longitud del eje mayor será la misma, pero cuanto más disten los focos entre sí, más alongada será la forma oval; y cuanto menor distancia haya entre uno y otro, más se parecerá esta forma á un círculo, lo cual llegará á ser si los focos se confunden en un mismo punto.

Como se ve, Mercurio es el que describe una órbita más excéntrica ó prolongada. Despues de él sigue Marte, siendo Vénus el planeta cuya órbita se acerca más al círculo. En el grupo de los pequeños planetas situados entre Marte y Júpiter, hay un gran número que tienen órbitas más excéntricas que las de Mercurio, por ejemplo la de Æthra, cuya excentricidad está representada por el número 0,3799257.

Así pues, cada planeta se sitúa á diferentes distancias del Sol en el curso de una de sus revoluciones. La más corta, PS (fig. 126), es la *distancia perihelia;* la mayor AS, es la *afelia*, y corresponden á los vértices del eje mayor de la elipse. MS, ó M'S, situados en los vértices del eje menor, representan respectivamente la *distancia media*.

SEGUNDA LEY.—*Las áreas recorridas por los radios vectores de un planeta alrededor del foco solar son proporcionales á los tiempos empleados en recorrerlas.*



Fig. 125.—Keplero

El radio vector es, segun hemos dicho, la línea recta, de longitud variable, que va del planeta al Sol. En su movimiento de circulacion se mueve el planeta con velocidad variable, que llega á su mínimum en el afelio y al máximum en el perihelio, de tal suerte que en un punto cualquiera de la órbita los sectores recorridos en tiempos iguales tienen superficies ó áreas iguales. Suponiendo que el astro recorre en un mismo espacio de tiempo los arcos AP, P_1P_2, P_3B, las superficies de los sectores ASP, P_1SP_2, P_3SB, serán iguales (fig. 127).

Pasemos ahora á la tercera ley.

TERCERA LEY.—*Los cuadrados de los tiempos periódicos son proporcionales á los cubos de las distancias medias, ó lo que es lo mismo, á los cubos de los ejes mayores de las órbitas.*

Las dos primeras leyes son verdaderas en particular para cada órbita planetaria y subsistirian tales cuales son áun cuando no circulara en torno del Sol más que un solo planeta. La tercera ley, por el contrario, expresa una relacion entre los elementos de dos planetas cualesquiera, y por consecuencia no tendria razon de ser en la hipótesis de que no hubiera más que un planeta; pero no por eso tiene ménos importancia que las otras dos, y como dice Biot, estas no proporcionaron á Keplero más que «los elementos individuales de los planetas en sus órbitas, sin establecer ninguna relacion entre ellos. Sin embargo, desde sus primeros pasos en la carrera astronómica, Keplero estaba íntimamente persuadido de que debia existir seme-

jante relacion, por cuanto los movimientos de los planetas, efectados todos en la misma direccion y que van siendo más lentos á medida que aquellos distan más del Sol, no podian carecer en absoluto de cierta conexion ni de obedecer á una ley comun (1).»

Desde entonces cifró todos sus esfuerzos en averiguar las verdaderas proporciones de las órbitas planetarias, y tras diez y siete años de investigaciones, de tanteos, los vió al fin coronados de éxito.

Las leyes de Keplero son las bases, por siempre memorables, de la astronomía planetaria. En su generalidad no tan sólo abarcan las órbitas de los planetas conocidos en tiempo de su inmortal inventor, sino tambien las de todos los descubiertos posteriormente; son aplicables sin modificacion alguna á los sistemas secundarios, es decir, á las órbitas que describen los satélites en derredor de cada planeta principal, y por último, excepto una modificacion en la naturaleza geométrica de las curvas, regulan

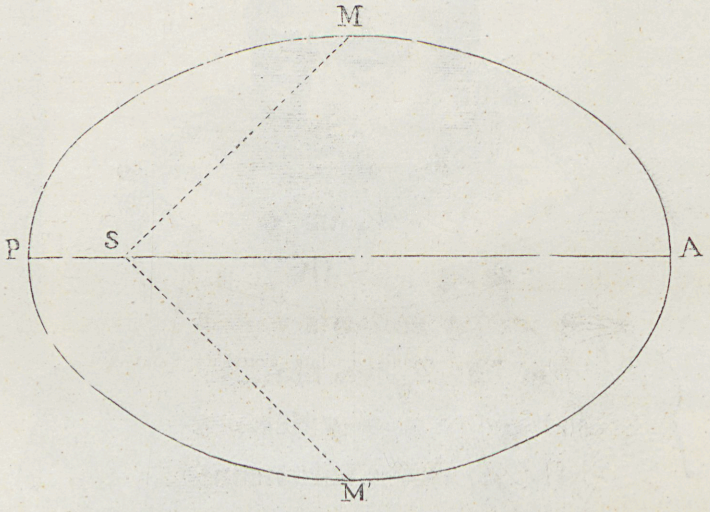


Fig. 126.—Distancias afelia, perihelia y media de un planeta

tambien los movimientos de los cometas y los de los cuerpos ó enjambres de corpúsculos que circulan en el interior de nuestro sistema. Gracias á estas leyes, tan luégo como la observacion nos revela la existencia de un astro perteneciente á alguno de dichos grupos y conocemos un número suficiente de sus distintas posiciones, podemos calcular todos los elementos de su revolucion, así como averiguar el plano de su órbita, su inclinacion, su excentricidad, y la duracion del período de su revolucion, y determinar ó predecir las posiciones futuras del astro con una precision que depende de la de las mismas observaciones.

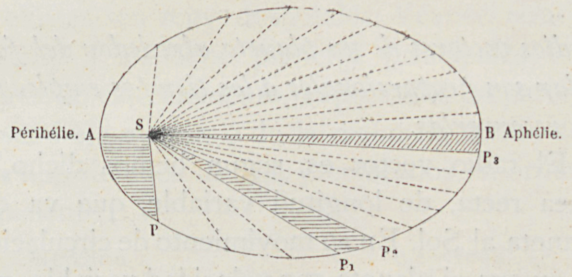


Fig. 127.—Ley de las áreas

Hay que advertir, sin embargo, que no se deben considerar esas leyes como la expresion rigurosa de la realidad; no son ni pueden ser más que aproximadas: como todas las leyes físicas están sujetas á variaciones ó perturbaciones que Keplero no pudo por fortuna sospechar, pues si así hubiese sido, probablemente le habrian inducido á desistir de sus investigaciones. Las observaciones astronómicas que se hacian en su tiempo no podian tener una rigurosa

---

(1) Hé aquí en qué términos anuncia el mismo Keplero el descubrimiento de la nueva ley en sus *Harmonices mundi:*

«Despues de haber averiguado cuáles eran las dimensiones verdaderas de las órbitas, gracias á las observaciones de Brahe y al esfuerzo continuo de un prolongado trabajo, he descubierto por fin la proporcion de los tiempos periódicos con la extension de dichas órbitas. Y si se quiere saber la fecha precisa, diré que fué el 8 de marzo del año corriente de 1618 cuando este descubrimiento, concebido primeramente en mi imaginacion, luégo tanteado torpemente por medio de cálculos y por consiguiente desechado como falso, emprendido de nuevo el 15 de mayo con creciente energía, se hizo luz á través de las tinieblas de mi inteligencia, quedando tan confirmado por mi trabajo de diez y siete años basado en las observaciones de Brahe y por mis propias meditaciones perfectamente concordantes, que al pronto creí soñar; pero no cabe la menor duda: es una proposicion muy cierta y muy exacta.....»

exactitud, aunque sí la suficiente para que Keplero haya podido responder de cierto error, bastante débil para que le pasasen desapercibidas las diferencias entre sus leyes y los hechos (1).

Aun no habia trascurrido un siglo desde la muerte de Keplero cuando ya estaban descubiertas estas anomalías; pero léjos de ser un obstáculo para la ciencia, lo que han hecho ha sido elevar las teorías astronómicas á mayor grado de exactitud, habiéndose demostrado que aquellas son consecuencia natural de las causas físicas que unen entre sí á todos los movimientos de los astros y cuyo corolario son precisamente las leyes del movimiento elíptico. Estas causas, ó mejor dicho, esta causa única estriba enteramente en el principio de la gravitacion ó de la atraccion universal, que el genio de Newton supo á su vez deducir de las leyes de Keplero. Cuando hayamos expuesto este gran descubrimiento, se comprenderá mejor lo que acabamos de decir acerca de las restricciones que deben tenerse en cuenta en el enunciado de las leyes del movimiento elíptico.

III

DESCUBRIMIENTO DE LA GRAVITACION INTERPLANETARIA POR NEWTON

Hácia el año 1665 fué cuando Newton concibió, segun se dice, en su posesion de Woolstrop, la primera idea de hacer extensiva á los cuerpos celestes la accion de la gravedad. Reflexionando en la naturaleza de esta fuerza que atrae sin cesar hácia el centro de la Tierra, no tan sólo los cuerpos próximos al suelo, sino tambien los de las regiones atmosféricas, sin que se advierta en esta propension disminucion apreciable, pensó si ese poder singular traspasaria tal vez los límites de la atmósfera misma, y extendiéndose hasta la Luna, seria la causa que retuviera á nuestro satélite en su órbita.

«Si la Luna está efectivamente retenida alrededor de la Tierra por la gravedad terrestre, los planetas, que se mueven alrededor del Sol, deben estarlo tambien en sus órbitas por su gravedad hácia este astro. Pero si semejante gravedad existe, su constancia ó su variabilidad, así como la energía de su poder á diferentes distancias del centro deben hacerse patentes en la variada velocidad de los movimientos de circulacion, y por consiguiente ha de ser posible deducir su ley de estos movimientos comparados.»

De este modo se vió Newton inducido á estudiar los movimientos planetarios cuyas leyes habia formulado Keplero, y á buscar en estas mismas leyes el secreto del vínculo físico que enlaza al Sol con todos los astros del sistema solar. Los reducidos límites de una obra tan elemental como la nuestra no nos permiten exponer cómo logró Newton resolver tan magnífico problema, cómo reconoció y demostró que la fuerza que obra de una manera continua sobre los planetas emana del Sol, que su intensidad, porporcional á las masas, está en razon inversa del cuadrado de las distancias, y cómo acabó por probar que esta fuerza es idéntica en todos los cuerpos del sistema y que no es otra que la fuerza de gravedad. Trataremos sin embargo de poner de manifiesto el encadenamiento de las ideas que enlazan la teoría de la gravitacion newtoniana con las leyes de Keplero.

El punto de partida es el hecho de observacion de que los planetas describen alrededor del Sol trayectorias curvilíneas, con velocidades variables. Ahora bien, el principio de la inercia de la materia, uno de los axiomas fundamentales de la mecánica, nos enseña que el movimiento de un cuerpo enteramente libre, es decir, de un cuerpo en el que no influye ninguna fuerza exterior, es forzosamente uniforme y rectilíneo, y como el movimiento de un planeta cualquiera no es lo uno ni lo otro, menester será que alguna fuerza influya en él para modificar su direccion y su velocidad. ¿Cuáles son el sentido y la direccion de esta fuerza? ¿Cuál la ley de su intensidad? Las dos primeras leyes de Keplero responden á estas preguntas.

Una de estas leyes dice que los radios vectores de los planetas recorren áreas proporcionales á los tiempos. Pues bien, Newton demuestra que, si la fuerza constante cuya exis-

(1) J. Bertrand expresa perfectamente esta circunstancia en su estudio sobre Keplero: «Keplero ha podido asegurar, dice, que era imposible un error de 8 minutos (en las observaciones de su maestro Tycho) y esta confianza lo ha salvado todo; si hubiera podido decir lo propio de un error de 8 segundos, todo estaba perdido, pues segun una expresion de Gœthe, el órgano interior del raciocinio hubiera cesado de estar en armonía con el órgano exterior de la vista, que habria adquirido demasiada delicadeza y sobrada precision». *(Los fundadores de la Astronomía moderna.)*

tencia es precisa para explicar el movimiento curvilíneo del astro, se dirige hácia el Sol, las áreas recorridas siguen precisamente la ley de proporcionalidad descubierta por Keplero, y prueba asimismo que las áreas dejarian de ser proporcionales á los tiempos si fuese cualquier otra la direccion de la fuerza aceleradora.

Así pues, tenemos determinada la direccion de la fuerza que retiene á los planetas en sus órbitas. Esta direccion es la de la línea que une el planeta con el Sol. En una palabra, la fuerza en cuestion emana del Sol mismo.

Pero ¿cómo varía su intensidad con la distancia, en su accion sobre el mismo planeta? ¿Qué ley regula esta intensidad en los diferentes puntos de la órbita? Si alguna cosa puede ilustrar por este concepto, es sin duda la naturaleza misma de la órbita, la forma elíptica que consigna la primera ley de Keplero y la posicion constante del Sol en uno de los focos de la curva. Y en efecto, esta primera ley ha proporcionado á Newton la solucion del problema (1).

Ha demostrado que, dada una órbita elíptica, la fuerza central, dirigida constantemente hácia el Sol y capaz por lo tanto de hacer recorrer al planeta áreas proporcionales á los tiempos, varía de intensidad en los diferentes puntos de la elipse; con respecto á dos distancias cualesquiera al foco solar, la intensidad de la fuerza es inversamente proporcional á los cuadrados de estas distancias. Tomemos por ejemplo al planeta Marte, y consideremos las tres posiciones que ocupa en su distancia media al Sol, en su perihelio y en su afelio (2). Si se representa por la unidad la fuerza que actúa sobre Marte á su distancia media, esta fuerza será más débil en el afelio y aumentará en el perihelio en razon inversa de las tres distancias. En el afelio, no pasará de 0,8366; en el perihelio, por el contrario, será igual á 1,1028. Esta misma ley de variacion de la fuerza central es aplicable á toda órbita planetaria elíptica, como consecuencia directa de las leyes de Keplero. Pero Newton no se atuvo solamente á la solucion directa del problema, sino que se planteó la cuestion inversa, esto es, averiguar si recíprocamente, todo cuerpo sometido á la influencia de una fuerza central que varía en razon inversa del cuadrado de la distancia al foco de atraccion, describe siempre una curva elíptica, habiendo visto que la forma de la órbita descrita alrededor del Sol como foco, puede ser, no tan solo la elipse, sino tambien la parábola

---

(1) Tomamos de Biot la exposicion sucinta de las deducciones merced á las cuales pudo llegar á esta solucion:

«Puede suponerse que el movimiento actual de un planeta, durante un espacio de tiempo muy corto, y en cualquier punto de su elipse en que se encuentre, es el mismo que si describiera un pequeñísimo arco de una circunferencia de círculo que fuese osculadora á la curva en dicho punto. Para que se mantenga instantáneamente en este arco, es preciso que la fuerza central descompuesta segun el radio del círculo que va á parar al punto de osculacion, iguale y contrabalancee por su oposicion la fuerza centrífuga inherente al movimiento circulatorio, la cual propende á sacar al móvil fuera de su órbita siguiendo la direccion de la vertical local, atrayéndole con una energía proporcional al cuadrado de su velocidad de atraccion actual y recíproca al radio osculador de la curva que aquel describe. Establecido el cálculo con arreglo á este enunciado, hé aquí el resultado de Newton. Cuando la órbita es una elipse y el centro de las fuerzas uno de sus focos, el equilibrio de los dos esfuerzos contrarios exige que la intensidad de la fuerza central varíe recíprocamente al cuadrado de la distancia del centro de donde emana, y á los puntos sobre los cuales obra. No pudiendo describirse libremente la elipse sino con esta condicion, su forma averiguada en las órbitas planetarias impone necesariamente esta ley de variacion á la fuerza emanada del Sol que las hace describir.

Al llegar aquí, Newton se ha propuesto el problema inverso. Suponiendo que un punto material libre esté mantenido en movimiento en un plano por una fuerza aceleradora central, que lo atrae con una energía recíproca al cuadrado de la distancia, la órbita que describirá ¿será forzosamente una elipse? Para saberlo, es indudablemente necesario aplicar á la fuerza central así definida el mismo método de descomposicion que anteriormente y poner tambien su componente normal en oposicion con la fuerza centrífuga dirigida segun el radio osculador de la órbita, dejando esta vez sin determinar la clase de curva á que este radio pertenece, é imponiéndole por única condicion que en cada uno de sus puntos haya equilibrio entre los dos esfuerzos que en ellos chocan. Con esta inversion de datos, Newton averiguó que, bajo la influencia de una fuerza aceleradora central, recíproca al cuadrado de las distancias, el establecimiento del equilibrio exige que la órbita sea, no precisamente una elipse, sino una seccion cónica cualquiera, uno de cuyos focos es el centro de las fuerzas; en la cual están comprendidas, además de la elipse, la parábola, la hipérbola y una circunferencia de círculo, pudiendo considerarse este último caso como una particularidad del primero. Si se supone que el punto material haya sido puesto en movimiento por un impulso dado á cierta distancia del foco de la fuerza central que le imprime su marcha curvilínea, la variedad de seccion cónica que se pone á describir depende de la intensidad del impulso inicial y de la distancia del centro á la cual se la ha aplicado. Su direccion no entra por nada en este resultado. Más adelante, Newton demostró que la parábola se realiza en el movimiento de los cometas, y que tambien se aplican á ella las leyes de Keplero, introduciendo en su enunciado las modificaciones convenientes para adaptarlas á una elipse cuyo eje mayor seria en este caso infinito.»

Biot añade que todavía no se ha observado que los astros descubiertos hasta aquí describieran una hipérbola. Pero lo que era cierto en la época en que así lo afirmaba (1857) no lo es ya hoy: cierto número de cometas catalogados tienen excentricidades que exceden en gran manera de la unidad, y por consiguiente, cuando han penetrado en nuestro sistema solar, describen órbitas hiperbólicas.

(2) Las distancias de Marte al Sol varían entre los límites extremos 1,0932611 que es la del afelio, y 0,9067389 que es la del perihelio, representando por 1 la distancia media. Esta distancia media es á su vez 1,5237 si se toma por unidad la distancia media de la Tierra. La excentricidad actual de la órbita de Marte es igual á 0,0932611.

y la hipérbola, es decir, cualquiera de las curvas llamadas *secciones cónicas* (1).

Los planetas y sus satélites describen elipses, hallándose en el mismo caso cierto número de cometas; pero la mayor parte de los cometas conocidos describen parábolas, ó por lo ménos elipses tan alongadas que es imposible distinguir de un arco de parábola el arco recorrido por estos cuerpos cuando son visibles

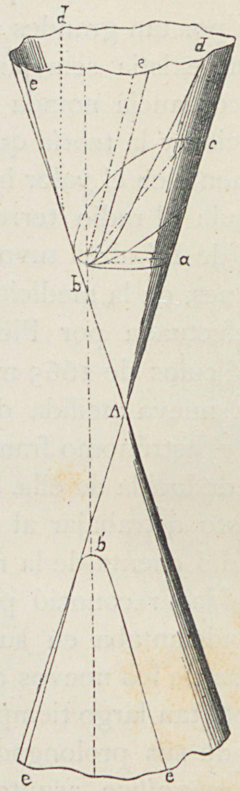


Fig. 128.—Secciones cónicas: círculo, elipse, parábola é hipérbola

desde la Tierra. Hay algunos que trazan positivamente hipérbolas.

Así pues, Newton, con su sabio y profundo análisis, no tan sólo descubria la ley física de los movimientos planetarios, sino que traspasando los límites á que estaba circunscrita la observacion en su época, hizo extensiva esta ley á los movimientos de los astros que se tenian por extraños al sistema solar. Y lo cierto fué que aplicando más adelante el mismo Newton sus cálculos al famoso cometa de 1680, consiguió probar que obedecia en sus movimientos á las mismas leyes que los planetas, fundando así del mismo golpe la astronomía cometaria.

Llegado el gran geómetra á este punto, tan sólo le restaba hacer extensiva á las órbitas comparadas de los planetas la ley de variacion de la intensidad de la fuerza central en razon inversa de los cuadrados de las distancias.

IV

LA GRAVITACION Y LA GRAVEDAD SON LA MISMA FUERZA

Antes de acometer en su generalidad este nuevo problema, Newton volvió á ocuparse de la cuestion que á sí mismo se planteara desde el principio de sus profundas especulaciones, es decir, de la relativa al movimiento de la Luna y á la accion de la gravedad terrestre sobre nuestro satélite.

La Luna circula alrededor de la Tierra, del propio modo que ésta y los planetas circulan alrededor del Sol. Su órbita es una elipse que describe con movimiento más ó ménos rápido, segun que varía su distancia á nuestro globo. En una palabra, le son aplicables las dos primeras leyes de Keplero, y por consiguiente, la fuerza que retiene á la Luna alrededor de la Tierra tiene su direccion constante hácia el foco de la órbita y su intensidad varía en razon inversa de los cuadrados de las distancias. Sabemos que tambien propenden á dirigirse al centro de la Tierra todos los cuerpos pesados que hay en su superficie; por consiguiente los efectos de la gravedad parece tener tal analogía con los de la fuerza aceleradora aplicada á la Luna, que la identidad de estas fuerzas tan sólo exigia una comprobacion. Era preciso ver si la intensidad de la gravedad en la superficie del globo, es decir, á una distancia del centro igual al radio terrestre, reducida en razon del cuadrado de la distancia de la Luna ó dividida por 3600 (cuadrado de 60, número que, como es sabido, representa esta distancia en radios terrestres) era efectivamente la medida de dicha fuerza aceleradora. La comparacion se reducia á calcular, con arreglo al conocimiento del movimiento de la Luna y de las dimensiones de su órbita, la cantidad que representa la caida

(1) Así llamadas porque resultan cortando la superficie de un cono por un plano. Si la seccion corta el cono recto por un plano oblicuo al eje, la figura es una *elipse;* si la seccion es perpendicular al eje, resulta un *círculo;* si se hace paralelamente á uno de los lados, resultará una curva de dos ramas que se extienden al infinito, y será una *parábola;* por último, cuando la seccion se hace por un plano que corta dos conos iguales opuestos por el vértice, la curva que resulta es una *hipérbola.* La figura 128 da un ejemplo de estas diferentes curvas: *ba* y *bc* son, la primera un círculo y la segunda una elipse; *dbd*, es una parábola, y *ebc*, *e'b'c'*, una hipérbola.

de este astro hácia la Tierra en un espacio de tiempo bastante corto para que, durante él, se pueda considerar la fuerza como constante, por ejemplo, en un minuto: una vez conocida esta cantidad, que es la medida de la intensidad de la fuerza, faltaba ver si era en efecto igual á la 3600ª parte del espacio recorrido en la superficie de la Tierra, durante un minuto, por un cuerpo que cae libremente por efecto de la gravedad.

Si la Luna va de L á L' en un minuto, asimilándola á un proyectil sometido á la accion

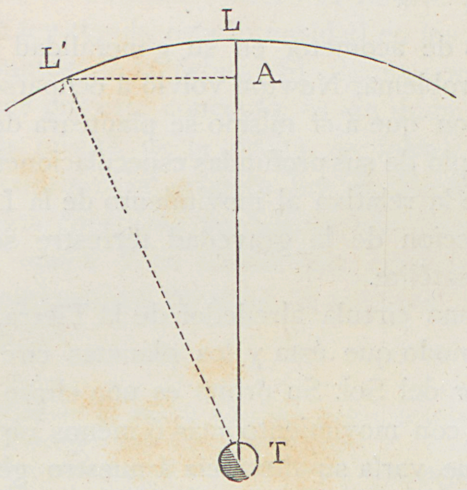


Fig. 129.—Cálculo de la intensidad de la gravedad á la distancia de la Luna

de la gravedad, su caida hácia la Tierra no es otra cosa sino el espacio LA (fig. 129); ó sea lo que se llama en geometría el *seno verso* del ángulo ó del arco descrito. Fácil es de calcular este espacio si se conoce el radio LT de la órbita ó sea la distancia de la Luna; esta distancia, expresada en radios del globo terráqueo, se conocia efectivamente en tiempo de Newton con bastante exactitud; sabíase que era poco más ó ménos igual á 60 radios terrestres; pero no sucedia otro tanto respecto al radio de la Tierra en la época de su primer ensayo (1665 á 1666). La cifra que entónces obtuvo como medida de la fuerza que retiene á la Luna en su órbita, resultó $^1/_6$ mayor de lo que exigia la identificacion de esta fuerza con la gravedad.

«Esta discordancia, dice Biot, que para cualquiera otro hubiera sido insignificante, parecióle á aquel varon de tan claro ingenio, una prueba suficientemente decisiva contra la arriesgada conjetura que habia formado. Pensó que alguna causa desconocida, análoga tal vez á los torbellinos de Descartes, modificaba con respecto á la Luna la ley general de gravedad indicada por el movimiento de los planetas. A pesar de esto no renunció á su idea principal: ¿cómo seria posible desechar semejantes ideas? Pero supo guardarla para sí, lo cual representaba un esfuerzo no menor y más conforme con su carácter reflexivo, y aguardar á que el tiempo le revelase la causa desconocida que modificaba una ley indicada por tan grandes analogías.»

En realidad no existia semejante causa. La razon de la discordancia notada por Newton entre la observacion y la teoría que concibiera, estribaba únicamente en el valor inexacto que á la sazon se atribuia al radio terrestre. Cuando la Sociedad real de Lóndres tuvo noticia, diez y seis años despues, de la medicion de un arco de meridiano efectuada por Picard, Newton reprodujo sus cálculos de 1665 modificándolos con arreglo á la nueva medida del grado proporcionada por el astrónomo francés ó á la del radio terrestre deducida de ella. Cuéntase que habiéndose puesto á trabajar al salir de la sesion en que se dió cuenta de la noticia de que acabamos de hablar, reconoció poco á poco, y á medida que adelantaba en sus cálculos, la dichosa influencia de los nuevos datos. La realizacion del objeto tan largo tiempo perseguido, la confirmacion de sus prolongadas meditaciones sobre tan magnífico asunto, causaron á Newton tan profunda emocion que no pudo terminar por sí mismo los cálculos empezados y tuvo que rogar á un amigo que los acabara por él.

Así pues la Luna gravita hácia la Tierra; y la accion de la gravedad traspasa los límites del globo y de su atmósfera y se extiende hasta por los espacios celestes. Basándose entónces Newton en la ley primordial ó axioma de mecánica que exige que toda accion ejercida por un cuerpo sobre otro vaya acompañada de una reaccion, es decir, de una accion igual, pero de sentido contrario, dedujo de ella que la Tierra gravita tambien hácia la Luna. Considerando luégo las leyes de los movimientos planetarios, las de los sistemas de satélites alrededor de su planeta respectivo, las de los satélites de Júpiter y Saturno, y comprobando la perfecta identidad de estas leyes entre sí y con las del

movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, y de ésta alrededor del Sol, pensó si podia suceder que las fuerzas centrales que producen todos estos movimientos y cuya intensidad en cada caso particular varía en razon inversa del cuadrado de la distancia, fuesen una sola y misma fuerza, idéntica á la de gravedad.

La tercera ley de Keplero, la que enlaza las dimensiones de los ejes mayores de las órbitas con las duraciones de las revoluciones, es independiente de las excentricidades, es decir, de la forma más ó ménos alongada de las elipses descritas; subsistiria pues tambien en la hipótesis de que cada planeta describiese alrededor



Fig. 130.—Newton

del Sol, aunque entónces con movimiento uniforme, círculos perfectos. Simplificando de esta suerte el problema, Newton llegó á comparar entre sí las fuerzas centrales que retienen á cada planeta en su respectiva órbita y á hacer ver que estas fuerzas son proporcionales á las masas á que se aplican, estando en razon inversa de los cuadrados de las distancias, de suerte que varían de un planeta á otro con arreglo á la misma ley que regula la intensidad de cada uno de ellos á las diferentes distancias en que cada planeta se encuentra respecto al Sol en el curso de su revolucion elíptica.

¿Qué debia deducirse de estas consecuencias de las leyes de Keplero, sino que una misma fuerza idéntica á la gravedad, es la causa de todos los movimientos de los cuerpos celestes en el mundo planetario, y que esta fuerza, á la cual dió Newton el nombre de *gravitacion* ó de *atraccion*, se ejerce del Sol á los planetas, de estos á los satélites, y por vía de reaccion, de los satélites y de los planetas mismos al Sol?

Pero no consistia todo en formular la ley; era preciso deducir sus consecuencias y seguirla estudiando hasta en sus últimas deducciones. Obra inmensa, tarea aterradora, que áun hoy dia distan mucho de haber terminado los astrónomos y geómetras. Newton se consagró con ahinco al estudio de este múltiple problema y tuvo la gloria y la fortuna de resolver muchas de sus importantísimas partes. Así lo expresa admirablemente Biot en su estudio sobre aquel gran genio.

«Tan luégo como Newton hubo reconocido como verdadera una ley que por espacio de tantos años le habia tenido indeciso por no

parecerle rigurosamente conforme con la naturaleza, se penetró al momento de sus más remotas consecuencias, y las fué siguiendo una por una con una fuerza, una constancia y una audacia de pensamientos como no se han visto ni se verán probablemente jamás en otro mortal.

»Porque ¿habrá por ventura otro que sea ya el primero en *demostrar* verdades de esta clase? Todas las partes de la materia gravitan unas hácia otras con una fuerza proporcional á sus masas y recíproca al cuadrado de sus mutuas distancias; esta fuerza retiene á los planetas y cometas en derredor del Sol, lo mismo que á cada sistema de satélites en torno de su cuerpo primario, y en virtud de la comunicacion universal de influencias que establece entre las partes materiales de todos estos cuerpos, determina la naturaleza de sus órbitas, la forma de sus masas, las oscilaciones de los flúidos que los envuelven, y sus menores movimientos, ya sea en el espacio ó bien sobre sí mismos, todo ello con arreglo á las leyes observadas. ¿Quién podrá en adelante dar la solucion de cuestiones naturales más elevadas que estas? Averiguar cuál es la masa relativa de los diferentes planetas; determinar las relaciones de los ejes de la Tierra; demostrar la causa de la precesion de los equinoccios; conocer la fuerza del Sol y de la Luna para levantar el Océano! Tal fué la magnitud y la sublimidad de los asuntos que se ofrecieron á la reflexiva mente de Newton tan luégo como éste hubo conocido la ley fundamental del sistema del mundo. ¿Debemos admirarnos de que al conocerla se conmoviera hasta el punto de no poder terminar la demostracion que de ella le cercioraba?.... Veia realizada la idea fija de toda su vida, logrado el objeto constante de sus deseos. Desde aquel punto se entregó por completo á disfrutar los goces que le causaba aquella deliciosa contemplacion. Durante los dos años que invirtió en preparar y desarrollar la inmortal obra de los *Principios de la filosofía natural*, en la que están consignados tantos y tan admirables descubrimientos, Newton no vivió sino para calcular y pensar; y si la vida de un sér sujeto á las necesidades de la humanidad puede ofrecer una ligera idea de la existencia pura de una inteligencia celeste, puede decirse que la vida del gran geómetra en aquella sazon presentó esta imágen.»

CAPÍTULO V

PERTURBACIONES PLANETARIAS

I

NINGUN CUERPO CELESTE DE NUESTRO SISTEMA SIGUE RIGUROSAMENTE LAS LEYES DE KEPLERO

Aun cuando el principio de la gravitacion universal se descubriera interpretando física ó mecánicamente las leyes de Keplero, es decir, las leyes del movimiento elíptico, en realidad estas leyes no son rigurosamente las de los movimientos planetarios. Lo hemos dicho ya y conviene que insistamos en ello: los planetas no describen elipses perfectas; sus órbitas no son planas ni las áreas trazadas por los radios vectores proporcionales á los tiempos. En una palabra, la órbita verdadera de un planeta es una curva que difiere más ó ménos de la elipse teórica, y cuyos elementos, posicion, forma y dimensiones varían por grados. Si imaginamos un planeta ficticio que se mueva con arreglo á las leyes del movimiento elíptico, en este caso el planeta verdadero oscilará á una y otra parte de aquél. Además, la misma órbita ficticia cambiará lenta y progresivamente. Estas oscilaciones, estas variaciones son lo que se conoce en astronomía con el nombre de *perturbaciones* ó *desigualdades*. Diremos desde luégo que se las divide en dos categorías: llámase *desigualdades periódicas* á las oscilaciones del planeta verdadero alrededor del planeta ficticio, las cuales se efectúan periódicamente en espacios de tiempo no muy considerable; y *desigualdades seculares* á las variaciones que afectan á los elementos mismos de las órbitas, teniendo estas períodos de extraordinaria duracion. Daremos algunos

ejemplos de unas y otras, y así se comprenderá mejor la razon de estas diferentes denominaciones.

Puesto que existen tales anomalías, puesto que el enunciado de las leyes de Keplero está sujeto á las restricciones de que acabamos de hablar, ¿consistirá en que la ley de la gravitacion es tan sólo una ley aproximada? Esto seria inferir una grave ofensa á la teoría.

No, no es así. El movimiento elíptico es una hipótesis, y una abstraccion por decirlo así la que se realizaria si no hubiera en el espacio más que el Sol y un planeta, porque la gravitacion se ejerce entre todos los cuerpos del sistema planetario, lo mismo del Sol á cualquier planeta, que de este planeta al Sol, ó que de un planeta aislado á todos los demás; en una palabra, porque las atracciones de todos los cuerpos del sistema son universales y recíprocas.

Tan luégo como un tercer cuerpo, una tercera masa interpone su accion, agrega su influencia á las influencias de los dos primeros, el movimiento se complica al punto; cada uno de los cuerpos es un perturbador del movimiento de los otros, y esta accion cambia á cada instante en razon de las variaciones que introduce el movimiento en las posiciones respectivas y en las distancias, en razon de las magnitudes de las masas puestas frente á frente. El problema que consiste en determinar con todo rigor, matemáticamente, los movimientos de los tres astros así enlazados, lo que se llama en astronomía *problema de los tres cuerpos*, es una cuestion de mecánica racional, de análisis matemática, que todavía no está resuelta, ni lo estará probablemente jamás. Pero debemos agregar que las soluciones aproximadas que han logrado darle los esfuerzos de los geómetras, bastan y áun sobran para satisfacer las necesidades actuales de la ciencia.

Además del Sol hay en nuestro sistema ocho grandes planetas, un crecido número de otros más pequeños y seguramente algunas masas desconocidas. Cada uno de ellos es un planeta perturbador respecto de los otros, de lo cual resulta la inmensa complexidad de la mecánica celeste, áun cuando se la limite al estudio del movimiento de los astros que pueblan nuestro mundo.

Lo que nos interesa comprender en este momento es que las perturbaciones, léjos de estar en contradiccion con la ley física descubierta por Newton, son por el contrario su más brillante confirmacion. Todas las desigualdades periódicas ó seculares se explican si se admite la universalidad de la ley, pero sin ella, son inexplicables. Esto es lo que resulta de los trabajos que el mismo Newton fué el primero en bosquejar, y que sus sucesores los Eulero, d'Alembert, Lagrange, Laplace, Le Verrier, Hansen, Delaunay, etc., han llevado á tal grado de perfeccion que es imposible la duda.

Procuraremos dar una idea del vínculo que une las perturbaciones de los cuerpos á su causa, esto es, á la gravitacion. Empresa temeraria seria tratar de hacer demostraciones rigurosas en un asunto en que apénas bastan todos los recursos de la geometría ó del análisis; pero quizás logremos demostrar al ménos la posibilidad de la solucion de tan grandes problemas.

II

LAS DESIGUALDADES SECULARES EN LOS MOVIMIENTOS DE LOS PLANETAS

Laplace clasifica en tres categorías principales los fenómenos en que se manifiesta la accion de la gravitacion.

La primera clase comprende todos los que dependen solamente de la tendencia que tienen los cuerpos celestes á aproximarse. Siendo la forma de todos los astros del sistema planetario parecida á la de una esfera, queda demostrado que actúan unos sobre otros, del propio modo que si las masas de las moléculas que los componen estuvieran condensadas en un punto, en su centro de figura. Los movimientos elípticos de los planetas, los de sus satélites, experimentan de esta suerte perturbaciones recíprocas, independientes de la forma así como de las dimensiones de los astros: siendo las desigualdades llamadas periódicas ó seculares fenómenos de esta primera clase.

Laplace coloca en la segunda á los que consisten en la tendencia de las moléculas de los cuerpos atraidos á reunirse con los centros de los cuerpos atrayentes. En este caso, la forma y las dimensiones del cuerpo atraido ejercen una influencia preponderante en las circunstan-

cias del fenómeno. Tomemos las mareas por ejemplo de esta segunda categoría de fenómenos: dependen aquellas efectivamente de la accion de la masa de la Luna y de la del Sol sobre las moléculas flúidas que constituyen el Océano terrestre, accion cuyos efectos se combinan con el movimiento de rotacion de nuestro globo. Podemos citar otro ejemplo, el de la precesion de los equinoccios, que es un fenómeno producido por la accion de las masas del Sol y de la Luna sobre las moléculas del rehenchimiento ó dilatacion ecuatorial: la precesion depende pues esencialmente de la forma aplanada de la Tierra y está ligada á la rotacion de toda su masa: es una perturbacion que afecta al movimiento de rotacion del globo terráqueo.

Por último, en la tercera categoría están comprendidos los fenómenos que producen la accion gravífica de las moléculas de los cuerpos atrayentes sobre los centros de los cuerpos atraidos: tales son las desigualdades del movimiento de la Luna engendradas por la forma aplanada de la Tierra; y los fenómenos que resultan de la accion de las moléculas de los cuerpos atrayentes sobre sus propias moléculas: la variacion de la gravedad en la superficie de la Tierra y la figura misma de nuestro globo son fenómenos de esta clase, fenómenos que ya hemos descrito y analizado en parte en cuanto dependen de la gravedad terrestre.

Réstanos ahora escoger algunos de los más notables en cada una de estas tres clases, de los más á propósito para patentizar las relaciones de causa á efecto que los caracterizan y los ligan á la gravitacion, así como de los más interesantes para la física de nuestro propio planeta. Tan sólo diremos una palabra de las desigualdades que afectan á los movimientos elípticos y nos detendremos algo más al tratar de las desigualdades seculares.

Las excentricidades de las órbitas planetarias varían, pero los períodos de estas variaciones son extraordinariamente prolongados; así es que, por lo que respecta á nuestra Tierra, la elipse que describe alrededor del Sol es unas veces más, y otras ménos alongada á una y otra parte de una excentricidad media: esta perturbacion reconoce por causa principal la accion de los planetas Júpiter y Saturno y tambien la de Vénus y de Marte.

Las inclinaciones varían: los nodos, es decir, los puntos en que cada órbita planetaria corta el plano de la eclíptica varían tambien, como asimismo los perihelios ó vértices de los ejes mayores más cercanos al foco comun. Unicamente son invariables dos elementos enlazados uno á otro, como es sabido, por la tercera ley de Keplero, es decir, las distancias medias al Sol y los períodos de revolucion (podemos decir tambien los movimientos medios).

Así pues, en la sucesion indefinida de los siglos, cada planeta se mueve en una órbita que cambia de forma, ora dilatándose y acercándose á la forma circular, ora contrayéndose y adquiriéndola más oval, siendo la elipse más alongada ó más excéntrica, pero sin que varíe la dimension del eje mayor; la distancia media cambia, pero las extremas varían circunscritas á límites definidos. Los planos mismos de estas órbitas oscilan y se desvian en el espacio, y las direcciones de los ejes mayores cambian con la latitud.

Pero, cosa digna de notarse, como esas lentas variaciones no son continuas, como oscilan entre máximas y mínimas que por lo general no son de gran amplitud (1), puédese deducir de

(1) Citemos algunos ejemplos de las desigualdades seculares de los principales planetas. Hé aquí, segun Le Verrier, los valores de las excentricidades y de las inclinaciones en 1800, como tambien los límites superiores á que podrán llegar los mismos elementos en la sucesion de los siglos:

Planetas	Excentricidades en 1800	Inclinaciones sobre la eclípt. en 1800	Límites superiores de las excentricidades	Límites superiores de las inclinaciones
Mercurio..	0.205616	7° 0' 5".9	0.225646	9° 16' 54"
Vénus..	0.006862	3 23 28 5	0.086716	5 18 30
La Tierra.	0.016792	0 0 0	0.077747	4 51 42
Marte..	0.093217	1 51 6 2	0.142243	7 9 10
Júpiter..	0.048162	1 18 51 6	0.061548	2 0 48
Saturno.	0.056150	2 29 35 9	0.084919	2 32 39
Urano..	0.046611	0 46 28 0	0.064666	2 33 18

Las desigualdades seculares no tienen períodos fijos; mas para dar una idea de la extraordinaria lentitud con que se efectúan, digamos que la excentricidad de la órbita de la Tierra ha tenido su último máximum hace 210,065 años, y que continuará decreciendo por espacio de unos 24,000. Otro ejemplo: el movimiento del perihelio de Saturno requiere 60,000 años para efectuar una revolucion completa: el de la retrogradacion de los nodos de Mercurio tiene un período que no baja de 2.700.000 años!

ello que el sistema planetario está dotado de una estabilidad por decirlo así indefinida, estabilidad que tan extensiva es al sistema de los satélites como al de los planetas. Segun Laplace, la atraccion preponderante de la masa del Sol es la que mantiene el conjunto del sistema de los planetas y asegura la regularidad de sus movimientos; así tambien, la poderosa accion de los grandes planetas sobre sus satélites es la causa de la estabilidad de estos sistemas secundarios.

«Si llegara á cesar la accion de Júpiter, dice, sus satélites, que se mueven en torno suyo con órden admirable, se dispersarian al punto, para describir los unos elipses muy alongadas alrededor del Sol, y alejándose indefinidamente los otros en órbitas hiperbólicas.»

III

LA PRECESION DE LOS EQUINOCCIOS.—DESCRIPCION DEL FENÓMENO.—NUTACION

La precesion es un fenómeno astronómico ya conocido unos dos siglos ántes de nuestra era; Hiparco, que observaba hace 2000 años en Alejandría, fué el primer astrónomo que hizo mencion de este movimiento, que hace retrogradar algo más de 50″ cada año los puntos equinocciales, aumenta progresivamente otro tanto las longitudes de las estrellas contadas á partir de un equinoccio considerado como fijo y establece una diferencia de duracion entre el año trópico y el año sidéreo, confundidos hasta entónces.

Antes de demostrar la relacion que existe entre este fenómeno y la gravitacion, de la cual es consecuencia necesaria, como lo probó Newton, describámosle tan claramente como nos sea posible.

Sábese que las longitudes son una de las coordenadas celestes que fijan las posiciones de los astros con relacion al plano de la eclíptica ó de la órbita de la Tierra. Cuéntanse á partir de un punto llamado *punto vernal*, que no es otro sino el punto equinoccial de primavera, posicion ocupada por el centro de la Tierra cuando el plano de su ecuador llega á pasar en cada revolucion por el centro del Sol.

Si este orígen de las longitudes, que es tambien el de las ascensiones rectas, permaneciese fijo, las longitudes celestes serian invariables. Pero no sucede así, y segun hemos dicho, el astrónomo Hiparco fué el primero que descubrió sus variaciones. Al comparar la longitud de la Espiga, estrella de primera magnitud de la constelacion de la Vírgen, tal cual resultaba de sus propias observaciones, con la que daban las hechas siglo y medio ántes por Timocaris, halló Hiparco un aumento de más de dos grados, resultado que tambien le dieron otras estrellas; pero las distancias de las mismas estrellas al polo de la eclíptica, ó latitudes celestes,

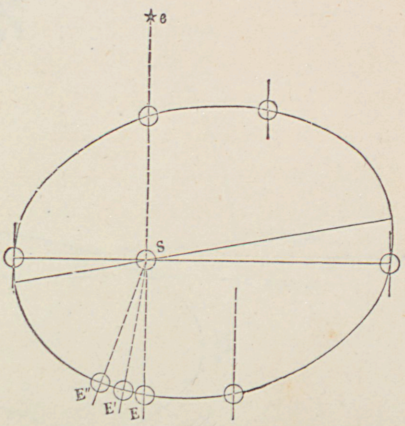


Fig. 131.—Retrogradacion de los puntos equinocciales

habian subsistido invariables. Las observaciones ulteriores contribuyeron á confirmar este aumento lento y progresivo de las longitudes celestes, que podia explicarse, ora por una retrogradacion del orígen de las coordenadas ó de los puntos equinocciales, ó bien por un movimiento directo de la esfera estrellada alrededor del eje de la eclíptica. De todos modos resultaba que la vuelta del Sol al mismo equinoccio tenia efecto ántes que su regreso á la estrella con la cual coincidia en el punto de partida. Por esto se dió al fenómeno el nombre de *precesion de los equinoccios*. Resultaba de él asimismo que el año trópico, es decir, el año definido como el intervalo comprendido entre dos equinoccios, de primavera por ejemplo, era de menor duracion que el *año sidéreo*, ó sea el intervalo comprendido entre dos pasos sucesivos del Sol por una misma estrella.

Pero ¿cómo representarse el movimiento mismo? Por este concepto, no se pueden hacer más que dos hipótesis: la una consiste en admitir que el plano del ecuador terrestre se desvia lentamente, de modo que su interseccion con el

plano de la eclíptica (línea de los equinoccios) retrograda $50''{}^{1}/_{3}$ en un año; la segunda en suponer que, permaneciendo inmóvil el ecuador, es la esfera estrellada entera la que gira con movimiento directo alrededor del eje de la eclíptica. Como para los antiguos astrónomos que consideraban inmóvil á la Tierra, la segunda hipótesis, que es la falsa, era la única admisible, la adoptaron como buena hasta los tiempos de Copérnico. Ahora se sabe que la primera es la verdadera, y que la precesion de los equinoccios reconoce por causa el movimiento del plano del ecuador sobre la eclíptica, que describe de este modo, en un período de 26,000 años, un cono de revolucion que tiene por eje el de la eclíptica (fig. 132). Tambien se puede definir este fenómeno diciendo que el eje de rotacion de la Tierra gira alrededor del eje de la eclíptica, conservando una inclinacion constante sobre el plano de la órbita.

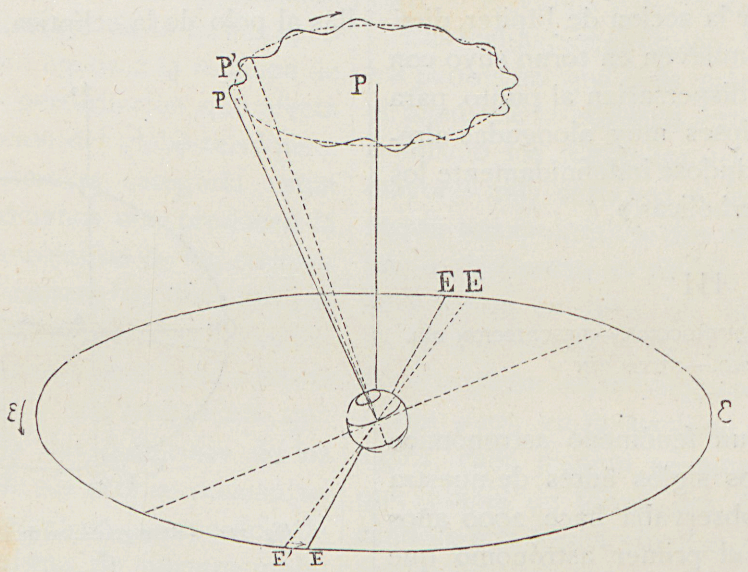


Fig. 132.—Movimiento cónico de la Tierra alrededor del polo de la eclíptica

Antes de exponer la teoría mecánica de la precesion, acabemos de indicar algunas de sus consecuencias astronómicas, pues consideradas desde el punto de vista terrestre, son de bastante importancia para que fijemos en ellas un momento la atencion.

Puesto que el eje de rotacion de la Tierra en torno del cual parece efectuarse el movimiento diurno de las estrellas se desvia de año en año, otro tanto sucede con los polos, que no coinciden ya con los mismos astros que en otro tiempo. Así es que el polo celeste boreal que desde remota fecha va acercándose á la estrella de la Osa menor, llamada *polar* á causa de su proximidad, continuará por espacio de 240 acercándose á dicha estrella, y siendo hoy de $1^{\circ}\ 20'$ la distancia que de ella lo separa, entónces no será más que de medio grado (figura 132). Luégo se alejará el polo más y más, pasará por la constelacion de Cefeo, despues por la del Cisne, y al cabo de 13,000 años resultará que ha descrito una semi-revolucion; estará en la Lira, casi á 47 grados de nuestra estrella polar actual. Dentro de 12,000 años será la estrella Vega la que por su brillo ha de hacer las veces de estrella polar, áun cuando su distancia al polo boreal sea casi cuádruple de la que hoy le separa de *alfa* de la Osa menor.

Otro de los efectos de la precesion de los equinoccios consiste en el cambio que se efectúa lentamente en las apariencias del cielo estrellado en las mismas épocas del año trópico, es decir, segun las estaciones. Por ejemplo, al llegar el Sol en tiempo de Hiparco al equinoccio de primavera, estaba en la constelacion de Aries; hoy, en la misma época del año, está á 27 grados de distancia, ó sea en los Peces. Las constelaciones que desfilan por el cielo durante el curso del año se han desviado del mismo modo. Por esta razon los signos del Zodíaco, cuyas denominaciones antiguas concordaban con las de las constelaciones eclípticas, no están ya hoy en relacion con ellas; cada

uno de ellos ocupa ahora en la bóveda estrellada poco más ó ménos el sitio que ocupaba el signo precedente en la época de Hiparco.

Por una razon semejante, las estrellas visibles en el horizonte de un lugar determinado no son idénticamente las mismas; los círculos de perpetua ocultacion y de perpetua aparicion cambian con el polo, su centro comun, y al paso que ciertas estrellas que no aparecian jamás en el horizonte se hacen visibles, otras desaparecen.

Así pues, la precesion de los equinoccios, tal cual la hemos definido, consiste en una desviacion progresiva del plano del ecuador sobre el plano de la eclíptica considerado como fijo, sin que varíe la inclinacion del primero sobre el segundo: en una palabra, supónese así que la inclinacion de la eclíptica es invariable.

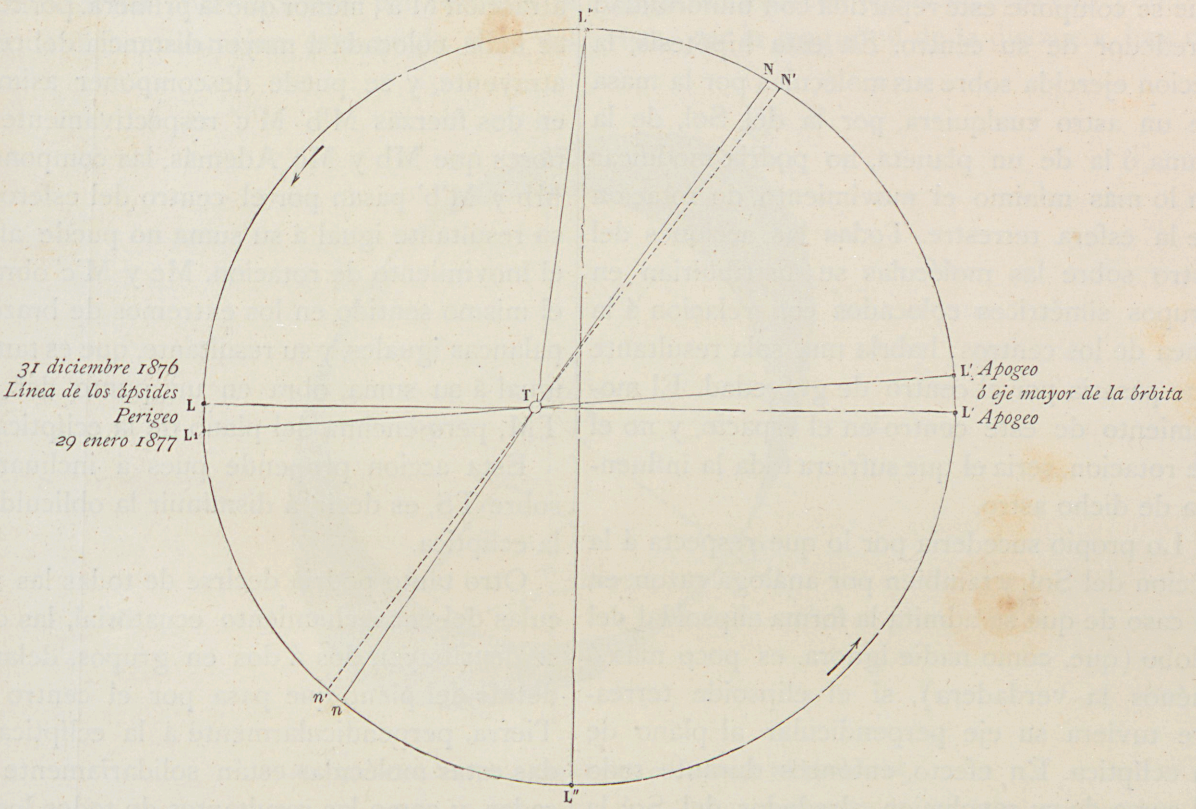


Fig. 133.—Retrogradacion de los nodos de la Luna y movimiento del perigeo: LL, movimiento directo del perigeo; *nn*' NN', movimiento retrógrado de los nodos, en el intervalo de una revolucion lunar

Pero á decir verdad, la oblicuidad está sujeta á variaciones periódicas, á oscilaciones, cuya duracion es precisamente igual á la de la desigualdad lunar que afecta á los nodos. Bradley descubrió en el siglo pasado estas variaciones que hasta entónces habian pasado desapercibidas de los astrónomos, y reconoció la coincidencia de los dos períodos, habiendo dado al fenómeno el nombre de *nutacion*.

Se puede definir la *nutacion* diciendo que el eje de la Tierra, además de su movimiento de precesion, describe alrededor de una posicion media pequeñas elipses cuyo eje mayor es de unos 18″, resultando de aquí ciertas variaciones en la oblicuidad de la eclíptica que llegan á 9″,65 en más ó en ménos de su valor medio. El período de la nutacion, de duracion igual á la de la retrogradacion de los nodos de la Luna, es de 18 años $^2/_3$.

IV

CAUSAS FISICAS DE LA PRECESION Y DE LA NUTACION.—ACCION DEL SOL Y DE LA LUNA EN LA DILATACION ECUATORIAL

Descritos ya los dos fenómenos de la precesion y la nutacion, restaba averiguar su causa física ó mecánica, empresa más delicada y difícil. Newton primero, y despues d'Alembert y Laplace, enunciaron su teoría. Estos grandes geómetras demostraron que la atraccion que ejercen el Sol y la Luna en el ensanchamiento ecuatorial del esferoide terrestre, basta para explicar entrambos fenómenos y todas las variaciones consignadas por las observaciones

astronómicas. Si bien no nos es posible exponer, siquiera de un modo elemental, la teoría, trataremos, segun hemos dicho ya, de hacer ver cómo interviene la gravitacion para producir en la rotacion terrestre las perturbaciones susodichas.

Supongamos ante todo á la Tierra rigurosamente esférica y formada de capas concéntricas homogéneas, de suerte que toda la materia de que se compone esté repartida con uniformidad alrededor de su centro. En esta hipótesis, la accion ejercida sobre sus moléculas por la masa de un astro cualquiera, por la del Sol, de la Luna ó la de un planeta, no podria modificar en lo más mínimo el movimiento de rotacion de la esfera terrestre. Todas las acciones del astro sobre las moléculas se distribuirian en grupos simétricos colocados con relacion á la línea de los centros: habria una sola resultante que pasaria por el centro de gravedad. El movimiento de este centro en el espacio, y no el de rotacion, seria el que sufriera toda la influencia de dicho astro.

Lo propio sucederia por lo que respecta á la accion del Sol, y tambien por análoga razon, en el caso de que se admita la forma elipsoidal del globo (que, como nadie ignora, es poco más ó ménos la verdadera), si el elipsoide terrestre tuviera su eje perpendicular al plano de la eclíptica. En efecto, entónces durante todo el curso de su revolucion alrededor del Sol la accion de la masa de este astro sobre el globo terráqueo seria tan igual encima como debajo del plano de la órbita; la resultante pasaria por el centro de gravedad de la Tierra. Pero sabemos que no es así, y que el eje alrededor del cual ejecuta nuestro planeta su rotacion diurna está inclinado unos 23° 28' sobre el plano de la órbita.

En realidad podemos considerar á nuestro globo como formado de dos partes invariablemente unidas entre sí. La una es el núcleo esférico que tiene por radio el radio de los polos; en esta parte es nula la accion de la gravitacion del Sol y de la Luna, en cuanto se refiere al movimiento de rotacion. La otra parte es el ensanchamiento ecuatorial, cuyo espesor va creciendo de los polos al ecuador.

La accion de la gravitacion luni-solar en este ensanchamiento es la causa de la *precesion* y de la *nutacion*. Para darnos cuenta de ella, empecemos por considerar aisladamente la accion de la masa del Sol, en la época de uno de los solsticios. El globo terráqueo ocupa entónces la posicion de la figura 134, con respecto al radio vector TS. Una molécula M de la dilatacion ecuatorial está sometida á una fuerza que puede descomponerse en dos, Mb, Mc. La molécula simétricamente situada, M', está sometida á la atraccion M'a', menor que la primera, por cuanto se halla colocada á mayor distancia del cuerpo atrayente, y se puede descomponer asimismo en dos fuerzas M'b' M'c' respectivamente menores que Mb y Mc. Además, las componentes Mb y M'b' pasan por el centro del esferoide y su resultante igual á su suma no puede afectar el movimiento de rotacion. Mc y M'c' obran en el mismo sentido en los extremos de brazos de palancas iguales, y su resultante, que es tambien igual á su suma, obra en un punto del radio TM, pero encima del plano de la eclíptica.

Esta accion propende pues á inclinar TM sobre TS, es decir, á disminuir la oblicuidad de la eclíptica.

Otro tanto podria decirse de todas las moléculas del ensanchamiento ecuatorial, las cuales se distribuyen dos á dos en grupos, delante y detrás del plano que pasa por el centro de la Tierra, perpendicularmente á la eclíptica. Todas estas moléculas están solidariamente enlazadas, y como las resultantes de todos los grupos tienen la misma tendencia, se puede considerar la accion del Sol como la resultante de todas estas acciones elementales. Esta resultante produciria un movimiento del ecuador hácia la eclíptica, es decir, una disminucion de la oblicuidad, si la Tierra estuviese inmóvil sobre su eje; pero combinándose el efecto con la fuerza que produce el movimiento de rotacion, se convierte en una retrogradacion de la línea de los nodos, es decir, de la interseccion del plano del ecuador con el plano de la eclíptica.

En resúmen, el fenómeno reconoce por causa la desigualdad de accion de la masa atrayente sobre las dos fracciones del ensanchamiento ecuatorial, una de las cuales se presenta directamente al Sol, y la otra, que está en la parte posterior del esferoide terrestre, se halla á mayor distancia del astro. Esta desigualdad llega á su máximum en uno ú otro solsticio;

siendo, por el contrario, nula en cada equinoccio, ó para hablar con más exactitud, no produce ningun efecto en el movimiento de rotacion, porque entónces la fuerza resultante se aplica al centro de gravedad de la Tierra.

En todo lo que precede tan sólo hemos considerado las moléculas que componen la dilatacion ecuatorial; si esta existiera sola, la precesion anual seria mucho más considerable de lo que indican las observaciones. En realidad, la masa de dicha dilatacion está unida á la del núcleo esférico, y como no es más que una fraccion muy pequeña de este, el movimiento retrógrado que sufre debe comunicarse á la masa entera de la Tierra, de suerte que el efecto resultante es mucho menor.

Tal seria la precesion, tal la causa que la produce, si el Sol fuese el único que actuara sobre el ensanchamiento ecuatorial de la Tierra. Pero, aparte de la accion de su masa, cuya magnitud está compensada, bajo este punto de vista, por la magnitud de la distancia, hay que

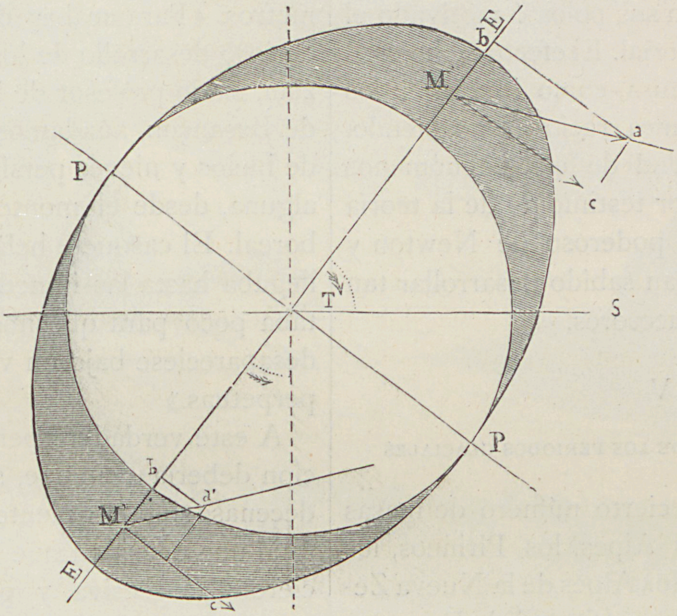


Fig. 134.—Explicacion mecánica de la precesion de los equinoccios

contar con la Luna, cuya masa es en verdad 26 millones de veces menor que la del Sol, pero cuya distancia á la Tierra es tambien 385 veces menor que la del astro solar.

La accion de la Luna se agrega en realidad á la del Sol para producir la precesion, y el efecto total, al que se da en este caso el nombre de *precesion luni-solar*, es el que hemos indicado más arriba, y en virtud del cual la línea de los equinoccios retrograda anualmente un ángulo de 50″,3.

Pero además de este efecto, la Luna produce otro, originado por las variaciones de posicion que sufre el plano de su órbita en un intervalo periódico de 18 $^2/_3$ años. De aquí resultan variaciones en la precesion y variaciones de período igual en la oblicuidad de la eclíptica. Este es el fenómeno que hemos descrito anteriormente con el nombre de *nutacion*.

Así pues, la teoría de la gravitacion habria bastado para descubrir las perturbaciones del movimiento de rotacion de la Tierra, si la observacion no hubiera indicado muchos siglos hace la existencia de la parte más considerable y discernible, la precesion; en cuanto á la nutacion, Bradley la hubiera deducido de sus observaciones tan pronto como sospechó su verdadera causa. Por lo demás, la perfecta concordancia que presentan, por una parte, las fórmulas mecánicas, y por otra las medidas efectivas, no da lugar á duda alguna.

Pero lo más maravilloso, lo más digno de la admiracion reflexiva de los hombres de ciencia, es ese encadenamiento de los efectos y las causas, de las acciones y reacciones de la fuerza de gravitacion, que resalta de la comparacion de fenómenos que en apariencia son completamente extraños unos á otros. ¿A qué causa se

deben esas lentas oscilaciones de períodos desiguales, ese balanceo cónico del eje de rotacion de la Tierra ó del plano de su ecuador? A la accion de las masas del Sol y de la Luna sobre la parte no esférica de nuestro globo, segun acabamos de ver. Este efecto de la fuerza de la gravitacion no hubiera ocurrido si el globo tuviese la forma rigurosa de la esfera. Pero ¿qué razon hay para esta falta de esfericidad? Ya lo hemos dicho: la accion de la gravedad combinada con la fuerza centrífuga engendrada por la rotacion, que ha producido el achatamiento de la Tierra en sus polos ó motivado el ensanchamiento ecuatorial. El efecto se ha convertido á su vez en causa, como lo exigen los principios de la mecánica racional, no siendo, lo repetimos, la realidad de estos fenómenos tan complejos, el menor testimonio de la teoría que concibió el genio poderoso de Newton y cuyas consecuencias han sabido desarrollar tan admirablemente sus sucesores.

V

CAUSAS ASTRONÓMICAS DE LOS PERIODOS GLACIALES

En la época actual, cierto número de masas montañosas, como los Alpes, los Pirineos, los Andes meridionales y los Alpes de la Nueva Zelanda contienen glaciares (fig. 135). En todas las regiones en que la altitud es suficientemente elevada, en que los vientos reinantes llevan consigo bastante cantidad de vapores para producir abundantes nevadas, la acumulacion de las masas de esta puede dar lugar á causa de la presion á la conversion continua de la nieve en hielo, y luégo al movimiento de progresion que constituye la marcha de los glaciares. Pero, á excepcion de las comarcas polares, en donde los glaciares existen todavía en espacios y proporciones considerables, por ejemplo, en Groenlandia y en el Spitzberg, los puntos del globo invadidos hoy por aquellos, presentan únicamente una superficie limitada, que no es más que una pequeñísima fraccion del área ocupada por las masas de montañas. La época actual, á pesar de sus glaciares, y aunque se la haga retroceder hasta más allá de los tiempos históricos, no es ni puede ser considerada como un período glacial.

La primera época geológica á la cual ha podido dar la ciencia legítimamente este nombre está comprendida entre el fin de la época terciaria y los comienzos de la cuaternaria ó más bien en el mismo principio de esta. Los glaciares tenian entónces una extension considerable. Todas las masas montañosas de Europa, los Vosgos y el Jura, el Morvan y las Cevennas, los Alpes y los Pirineos, estaban invadidas por ellos; los glaciares de los Alpes cubrian toda la Suiza y descendian por el valle del Ródano hasta Lyon; los de los Pirineos se extendian por las llanuras hasta la escasa altitud de 200 metros. «Para acabar de dar una idea del prodigioso desarrollo de los glaciares, dice M. Vezian, sabio profesor de la Facultad de ciencias de Besançon, añadamos que habia una sábana de hielos y nieves persistentes, sin interrupcion alguna, desde el monte Blanco hasta el polo boreal. El casquete helado que rodeaba el polo llegaba hasta las inmediaciones de Paris, y faltaba poco para que nuestro hemisferio entero desapareciese bajo un vasto sudario de nieves perpetuas.»

A este verdadero período glacial, cuya duracion deberia contarse, segun M. Lyell, no por decenas, sino por cientos de miles de años, siguió una época en que los glaciares desaparecieron progresiva y parcialmente por haber subido la temperatura; luégo sobrevino, aunque en ménos proporciones, un nuevo desarrollo de los mismos fenómenos, de suerte que se pueden contar dos períodos glaciares en la edad geológica de que aquí se trata, es decir, durante la época cuaternaria.

Estos son los únicos períodos de que hacian mencion, poco tiempo há, los tratados de geología; mas hoy, y este punto es de gran importancia para la cuestion que nos ocupa, se conviene generalmente en que ha habido otras épocas glaciales en las edades anteriores. Monsieur Vezian ha aducido muchas pruebas de ello en una leccion sobre el período glacial falúnico, y M. Lyell ha consignado en sus *Principios de geología* todos los vestigios observados por Ramsay y otros geólogos, los cuales prueban con mayor ó menor evidencia la accion glacial en las épocas terciarias y secundarias, en el mioceno superior, en el eoceno, en el terreno carbonífero y en el devónico. Sin embargo; cuando se llega á las capas más antiguas de los

terrenos paleozóicos, se desvanecen cada vez más las huellas de esta accion, y se ve que han desaparecido poco á poco los caractéres merced á los cuales se pueden conocer los períodos glaciales, como los cantos erráticos y los guijarros estriados, las rocas bruñidas y rayadas por el acarreo de las masas de hielos y los aluviones glaciales, de suerte que no puede asegurarse si la falta de estos vestigios en los terrenos cámbrico, silúrico y laurentino, prueba que las edades geológicas á ellos correspondientes no han sido testigos de períodos glaciales, ó si, en caso afirmativo, ha habido simplemente desaparicion y por último destruccion de los indicios, relativamente poco duraderos, por medio de los cuales se revela la accion de los glaciares.

Por lo demás, basta saber para el estudio de la cuestion que en la sucesion de las edades geológicas ha habido, no ya un solo período glacial, sino una serie más ó ménos numerosa de períodos semejantes que no podemos definir mejor de lo que lo ha hecho M. Vezian en estos términos: «Debe entenderse por *período glacial* una época durante la cual sufrió momentáneamente la temperatura un descenso bastante notable, ya para originar la aparicion de los glaciares, dado caso de que no existiesen desde la época anterior, ó bien para darles, si es que existian, una expansion mucho mayor.»



Fig. 135.—Un glaciar en el Spitzbebg

¿De qué circunstancias meteorológicas ó físicas depende la formacion del hielo?

Nadie lo ignora. Es preciso que, principalmente miéntras duran las estaciones invernales, caigan copiosas nevadas en la region montañosa en que aquel se forma; es menester que las nieves acumulen en ella masas bastante grandes para resistir los efectos reunidos de la evaporacion y de la fusion originada durante los estíos por la radiacion solar. Así pues, una de las condiciones indispensables para los fenómenos de los glaciares es una altitud elevada, si la region que se considera está en las zonas templadas, ó á falta de la altitud, un clima ártico ó polar en las altas latitudes. En una palabra, es necesario el frio, pero un frio intenso; siquiera no lo sea ménos el calor, segun lo han hecho observar con mucha razon Tyndall y otros físicos; porque la abundancia de nieves implica una prévia y abundante formacion de vapor de agua en la atmósfera, y la evaporacion de que se trata no puede deberse sino á la accion de una temperatura elevada, tanto en la

superficie del mar como en las capas atmosféricas que sobre ella pesan. Una vez formado el vapor y trasportado por las corrientes aéreas, ya sea á la cumbre de las montañas, ó bien á las regiones polares, experimenta allí una condensacion y un enfriamiento suficiente para convertirlo en nieve. A no ser por el calor de que hablamos y sea cualquiera su orígen, ni habria evaporacion, ni nieves y por consiguiente tampoco glaciares; á no ser por el trasporte de las masas de vapor y la baja temperatura que no tan sólo lo condensa sino que tambien lo hiela, podria haber lluvias abundantísimas, pero no nieves y por lo tanto, tampoco glaciares.

Tales son, en dos palabras, las condiciones físicas del fenómeno general, abstraccion hecha de todos los detalles secundarios. Ambas condiciones existen hoy, han existido durante la época actual, y probablemente tambien durante todas las épocas geológicas en mayor ó menor escala. Para que determinen un período glacial, en el sentido en que lo comprenden los geólogos, y segun la definicion que más arriba hemos dado, es pues preciso que una ú otra de dichas condiciones, ó las dos á la vez, hayan sufrido en ciertas edades marcadas alternativas de aumento ó disminucion en la intensidad de su modo de manifestarse. Es preciso que el enfriamiento haya sido muy grande durante un espacio de tiempo suficientemente largo para que las nieves hayan invadido varias regiones hasta entónces respetadas cubriéndolas de glaciares.

Examinemos pues las causas posibles de enfriamiento del globo terráqueo, para ver á cuáles se puede atribuir los fenómenos glaciales.

La Tierra recibe en su superficie calor de tres focos principales. El primero es el que le pertenece exclusivamente, el que posee en el interior de su masa y que es un calor de orígen. El segundo procede de la radiacion directa del Sol, que segun es sabido se difunde con bastante desigualdad por uno ú otro hemisferio, segun que varíen las estaciones para un mismo lugar ó la latitud para dos lugares diferentes. El tercer foco de calor es el que procede de las radiaciones de los demás astros, el que constituye lo que se llama la temperatura del espacio, temperatura que marcaria un termómetro en el sitio que ocupa nuestro globo á cada instante, si llegaran á extinguirse su calor interno y la radiacion solar. Los físicos no están acordes sobre el grado de elevacion de esta temperatura, pero en todo caso, dista mucho de ser despreciable, y probablemente constituye una fraccion respetable de la temperatura que establece en el espacio la radiacion del mismo Sol.

No podemos decir otro tanto del calor interior que, desde las edades geológicas, ejerce escasa influencia en la temperatura de la superficie del globo; pues segun las averiguaciones de Fourier, no puede contribuir actualmente á elevar la temperatura sino en una fraccion de grado insignificante ($^1/_{30}$).

Basta pues examinar qué variaciones pueden tener los otros dos focos, ambos astronómicos. Pero pronto veremos que tambien es posible explicar los fenómenos glaciales atribuyéndolos á un enfriamiento local dependiente de causas físicas ó terrestres.

Procedamos con órden y enumeremos ante todo las diferentes variaciones de orígen astronómico capaces de producir un enfriamiento local ó general en la superficie del planeta.

La curva que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino que forma una elipse cuyo foco lo ocupa el Sol. Así pues, las distancias de este astro varían de continuo, y por consiguiente tambien varía la intensidad del calor que envia á la Tierra. Además, el eje de rotacion terrestre, ó lo que es lo mismo, el plano del ecuador está inclinado sobre el plano de la órbita cierto ángulo que se llama *oblicuidad de la eclíptica.* De ambas circunstancias resultan todas las variaciones de temperatura que se suceden en el ciclo del año trópico, y que constituyen las estaciones de ambos hemisferios.

Dos líneas, las de los equinoccios y de los solsticios, determinan, en virtud de la velocidad variable del planeta, el tiempo que invierte en recorrer cada uno de los cuatro arcos desiguales así formados. Otra línea digna de tener en consideracion es la de la direccion del eje mayor, llamada *línea de los ápsides:* la Tierra se halla en uno ú otro de los extremos de esta línea, ya á su menor distancia del Sol, ó sea en el perihelio, ó bien á su mayor distancia, esto

es, en el afelio. Si la línea de los equinoccios y la de los ápsides conservaran siempre, en la sucesion de los tiempos, una posicion relativa invariable, no podria ocurrir cambio ni variacion alguna en el órden ni en la duracion de las estaciones que, si bien continuarian desiguales, serian por lo ménos constantes en cada hemisferio. Pero ya hemos visto que hay dos fenómenos astronómicos que contribuyen á modificar de continuo esta posicion relativa. El primero es la precesion de los equinoccios. El segundo, que es un movimiento contrario al anterior, cambia la direccion de la línea de los ápsides: es el movimiento del perihelio. A causa de la combinacion de estos dos movimientos, los equinoccios y los solsticios y todas las posiciones intermedias cambian constantemente en la órbita elíptica de nuestro planeta, resultando de aquí que el orígen de las estaciones y sus duraciones relativas varían en el curso de las edades, de modo que recorren un ciclo entero en un período que puede calcularse en 21,000 años en números redondos.

Pero estas variaciones no son las únicas, porque tampoco permanece constante la oblicuidad de la eclíptica, sino que disminuye unos 0",5 cada siglo, ó más claro, que el eje del globo se endereza esos cinco décimos de segundo cada cien años. Todavía no se ha podido precisar con toda exactitud los límites de esa lenta variacion, que si llegara á ser indefinida, ocasionaria á la larga la perpendicularidad del eje, la igualdad de los dias y las noches todo el año é igual distribucion de la luz y el calor en los dos hemisferios, estado que se califica con bastante impropiedad dándole el nombre de primavera eterna. Pero si la teoría no ha podido determinar todavía los límites entre los cuales oscila la oblicuidad de la eclíptica, sabe sin embargo que estos límites existen, y que despues de haber disminuido hasta bajar, segun Laplace, como 1° 20', la oblicuidad se estacionará para emprender de nuevo una marcha creciente.

Por último, otra variacion secular modifica la órbita de la Tierra: la del elemento que se llama excentricidad. ¿Cuánto importa esta variacion secular? Biot calculaba esta disminucion en 1,400 leguas por siglo ó sea 14 por año: todos los años se acerca la Tierra 14 leguas al Sol en el afelio, y se aleja otras tantas en el perihelio. Hace unos 200,000 años que la excentricidad debió llegar á su último máximum.

Para explicar los períodos glaciales se ha recurrido á otros fenómenos astronómicos independientes del movimiento de nuestro planeta, pero que pueden modificar su estado térmico. Sábese que la actividad de la radiacion solar está sujeta á oscilaciones: verdad es que los períodos conocidos son tan cortos que seguramente no tienen ni pueden tener ninguna relacion con los períodos glaciales; pero debemos decir que algunos astrónomos se inclinan á suponer que esta actividad ha podido experimentar crísis más ó ménos análogas á las que ocurren en las estrellas efímeras, en las estrellas variables de largos períodos. Consignemos sin embargo como recuerdo el paso de largos regueros nebulosos ó meteóricos, que interponiéndose por espacio de años, de siglos enteros entre el Sol y la Tierra, pueden haber sido causa de enfriamientos más ó ménos duraderos.

Se ha querido tambien explicar estos cambios diciendo que dimanaban del movimiento de traslacion que arrastra por el espacio á todo el sistema solar, y con él á nuestra Tierra, en direccion de la constelacion de Hércules. Suponiendo que la temperatura del espacio varíe segun las regiones recorridas, puede concebirse que nuestro globo haya pasado diferentes veces por ciertas regiones que han producido en su superficie enfriamientos más ó ménos intensos y á propósito para explicar la aparicion de los períodos glaciales.

Finalmente, debemos mencionar asimismo una postrera hipótesis, que ya no es astronómica, sino que pertenece al dominio de la física terrestre ó de la geología, y á la cual parece atribuir Lyell la mayor importancia en la produccion de los fenómenos glaciales. Nos referimos á los movimientos que continuamente ocurren en la costra sólida del globo, en el relieve, distribucion y altitud de las masas continentales, en los levantamientos ó hundimientos alternativos del suelo y del fondo de los mares.

Terminada ya nuestra enumeracion, veamos qué influencia se puede atribuir á la precesion de los equinoccios, al movimiento del perihelio y á la variacion de excentricidad.

El solsticio de invierno del hemisferio boreal

está actualmente casi á 10° del perihelio: hácia el año 1250 estos dos puntos coincidian y la línea de los solsticios formaba una sola línea con la de los ápsides. Resulta de aquí, como es sabido, una diferencia notable en la duracion de las estaciones en cada hemisferio, pero sobre todo en las condiciones térmicas de las estaciones opuestas comparadas de un hemisferio á otro. En el hemisferio norte, las estaciones invernales son más cortas y además corresponden á las distancias menores del Sol á la Tierra. Las estaciones estivales son las más largas y comprenden las distancias mayores. Síguese de aquí una especie de compensacion que hace ménos desiguales las temperaturas medias de estas estaciones. Lo contrario precisamente sucede en el hemisferio austral que, por razones forzosamente contrarias, tiene veranos más cortos y más calurosos, inviernos más largos y más frios, y en una palabra, condiciones más favorables para que ocurran fenómenos glaciales.

A causa de la precesion de los equinoccios y del movimiento inverso del perihelio, se dará el caso contrario en un intervalo de unos 10,500 años, es decir, en el año 11750. Hay dos períodos intermedios que corresponden á la coincidencia de la línea de los equinoccios con la de los ápsides. Así, en el año 3985 ántes de nuestra era, el perihelio y el equinoccio del otoño boreal estaban en un mismo punto, y lo propio sucederá dentro de cuarenta y seis siglos, hácia el año 6480, en que el equinoccio de la primavera boreal caerá á su vez en el dia del paso de la Tierra por el perihelio, ó sea á su menor distancia del Sol.

Estos cambios incontestables que hacen que cada 10,500 años alternen períodos de enfriamiento y de elevacion de temperatura de un hemisferio á otro, ¿son tal vez causa de los fenómenos glaciales? No falta quien lo haya sostenido así, y especialmente M. Adhemar en sus *Revoluciones del mar*, explicando de tal modo los períodos glaciales á la vez que los fenómenos diluvianos. Pero se ha objetado con razon que una diferencia de ocho dias entre las duraciones de las estaciones invernales reunidas y las de las estivales es sobrado insignificante para explicar unos fenómenos tan notables como los de los períodos glaciales. Además, nuestro hemisferio austral deberia de encontrarse hoy en semejantes condiciones, lo cual no se nota en modo alguno. Por último, á los geólogos les parece muy corto el período de 10,500 años en atencion á la duracion probable de los períodos glaciales y de los interglaciales. Por lo demás, es imposible separar de unos fenómenos que se desarrollan simultáneamente ciertas causas de variacion que tan pronto pueden obrar de consuno como en sentido opuesto, pero que están necesariamente mezcladas en la naturaleza.

Las variaciones de la excentricidad son más importantes que las de que acabamos de tratar. Calculando los señores Stone y Croll los efectos de estas variaciones en las desigualdades de duracion de las estaciones terrestres, han demostrado que eran mucho mayores que los que proceden de la excentricidad actual. Por ejemplo, cien mil años ántes del de 1800, la excentricidad de la órbita era casi el triple de la actual, resultando de aquí una diferencia de veintitres dias de exceso del invierno que caia en el afelio sobre el verano que caia en el perihelio, diferencia que llegaba á veintiocho dias en una época dos veces más remota, y remontándose hasta á ochocientos cincuenta mil años más allá del mismo punto de partida, se encuentra una diferencia de treinta y seis dias.

Puede convenirse en que tan gran exceso de duracion del invierno sobre el verano ocasione un enfriamiento intenso, capaz de producir fenómenos glaciales en grande extension; tanto más cuanto que el prolongado y frio invierno de la época considerada sucedia á un verano corto, pero muy caluroso, y por consiguiente los fenómenos de evaporacion aumentaban de intensidad al mismo tiempo que los de condensacion. La hipótesis de Croll—nombre del sabio que la formuló por primera vez—consiste pues en explicar la aparicion de los períodos glaciares por el efecto simultáneo de las variaciones de la excentricidad terrestre y de los movimientos combinados de la precesion y del perihelio, en las épocas en que dicha excentricidad llega á su máximum. Hácese á esta hipótesis una objecion que únicamente los geólogos son competentes para admitir ó rechazar, á saber, que el período de 10,500 años es muy corto; y que áun considerándolo como subdivision de

un período mucho mayor que comprende tantas veces 10,500 años como lo permite la existencia de una excentricidad considerable, siempre resulta una duracion insignificante.—No pretendemos discutir aquí las razones que militan en pro ó en contra de las varias hipótesis puestas; nuestro objeto ha sido únicamente demostrar la importancia de las perturbaciones seculares experimentadas por el planeta, á causa de la gravitacion universal, para conocer mejor las cuestiones relativas á la historia de su pasado, y por lo mismo á su historia futura.

CAPÍTULO VI

LAS MAREAS

I

MAREAS OCEANICAS. — DESCRIPCION FÍSICA DEL FENÓMENO

Las mareas son otra prueba manifiesta de la accion de las masas de la Luna y del Sol sobre la Tierra, y tambien un fenómeno de la segunda categoría, es decir, producido por la propension de las moléculas del cuerpo atraido á dirigirse á los centros de los cuerpos atrayentes. En este caso es la movilidad de las aguas de los océanos y de los mares la que produce sus oscilaciones periódicas por efecto de la influencia de los dos astros, y en este caso tambien veremos cómo resulta una reaccion que debe alterar, si bien en un espacio de tiempo sumamente largo, la duracion de la rotacion del globo terráqueo sobre su eje.

El fenómeno de las mareas tiene demasiada importancia para la física terrestre para que no entremos en algunos detalles sobre sus circunstancias y sobre su causa. Empecemos por describirlas.

Nadie ignora que las costas del Océano ofrecen dos veces al dia, con unas 12 horas y 25 minutos de intervalo, el espectáculo de la marea creciente; las aguas suben poco á poco, invaden la playa, cubriéndola á una altura cada vez mayor, y despues de crecer seis horas llegan á su máximum.

Apénas llegado el momento de la *pleamar*, cesa el *flujo*, empieza la marea descendente, y el *reflujo* sucede al flujo. El mar se retira entónces de la playa que habia invadido y baja poco á poco hasta su punto de partida; resultando entónces la *bajamar* ó *marea baja*. En seguida empieza de nuevo otra marea creciente, seguida de una bajamar y así sucesivamente.

Hay que advertir que el instante de la bajamar no es precisamente la mitad del intervalo que separa dos pleamares consecutivas, porque el flujo dura ménos que el reflujo, ó si se quiere, el mar invierte más tiempo en bajar que en subir. Esta diferencia varia segun los puertos, y siendo solamente de 16 minutos en Brest, llega en el Havre á 2 horas 16 minutos.

Tal es en conjunto el fenómeno de las mareas. Si no se hubiera pasado de la observacion de esta periodicidad de los movimientos del mar, la ciencia no habria penetrado muy profundamente el misterio de sus causas; no habria podido predecir, como lo hace hoy con toda seguridad, la intensidad de las mareas en los diferentes puertos, ni las épocas precisas de las más altas, que tan preciosas indicaciones proporcionan á la navegacion.

Antes de pasar á exponer las causas de este fenómeno, precisaremos más los hechos para proceder conforme á la marcha natural de la ciencia.

Hemos dicho que el intervalo que media entre dos pleamares es de 12 horas 25 minutos. De aquí resulta que la pleamar tiene un retraso de 50 minutos cada dia; y por consiguiente, el período diario del fenómeno es precisamente igual al dia lunar (1), que dura tambien 24 horas 50 minutos. En otros términos, los retrasos sucesivos de las pleamares son los que presentan los pasos sucesivos de la Luna por el meridiano. Si se anota, pues, la hora del flujo en un

(1) Intervalo que trascurre entre dos pasos sucesivos de la Luna por el mismo meridiano superior.

puerto, será fácil averiguar la hora en que tendrá lugar otro dia. Los marinos aprovechándose de esta circunstancia, adoptan sus disposiciones en consecuencia, segun que quieran entrar dicho dia en el puerto ó salir de él.

Fijémonos además en otra circunstancia: 50 minutos diarios de retraso dan en unos 14 dias y tres cuartos un retraso total de 12 horas; ó sea uno de 24 horas ó de un dia en 29 dias y medio, es decir, en el período de una lunacion.

Así pues, las horas de las mareas en un puerto determinado son las mismas cada quince dias, con la diferencia de que las de la mañana vienen á ser las de la noche y recíprocamente. Al cabo del mes lunar, la hora vuelve á ser exactamente la misma.

Los hechos que consignamos aquí se refieren solamente á las horas de las mareas y á sus variaciones. Ocupémonos ahora de la intensidad del fenómeno.

Esta intensidad es á su vez muy variable en un mismo mar y en un mismo punto; pero áun en este caso se presenta una periodicidad notable, que demuestra la conexion que tiene el fenómeno con las posiciones relativas del Sol, de la Luna y de la Tierra.

Cerca del novilunio y del plenilunio la pleamar llega á su altura máxima, al paso que la bajamar correspondiente desciende por el contrario hasta su mayor depresion. Estas son las *grandes mareas*, ó mareas de *sizigias*. Desde entónces empieza á disminuir progresivamente la altura de las mareas hasta la época de los cuartos creciente y menguante de la Luna: entónces ocurren las *mareas muertas* ó mareas de las *cuadraturas*. Luégo, á partir de estas dos épocas hasta las sizigias, la altura de las pleamares emprende otra vez su marcha creciente.

Mas á decir verdad, tanto la marea mayor como la menor no ocurren en el dia mismo de la fase lunar; en todos los puertos del Océano se nota una diferencia de 36 horas ó sea dia y medio. Así pues la tercer marea que sigue al plenilunio y al novilunio es la más alta, lo propio que la más baja es la tercera que sigue á las cuadraturas. Tanto los períodos cotidianos como los mensuales ofrecen asimismo perfecta coincidencia con los fenómenos luni-solares.

Esta notable coincidencia entre las horas, los períodos de las altas mareas y las posiciones de la Luna y del Sol con relacion á la Tierra, fué la que hizo sospechar hace ya mucho tiempo que la causa del fenómeno residia en aquellos dos astros. «*Causa*, dice Plinio, *in Sole Lunâque*.....» Pero ¿de qué clase es su influjo? Tal era el problema cuya solucion estaba reservada á la ciencia moderna. Descartes fué el primero que osó rasgar el velo y sondear el misterio, y si el gran filósofo no salió airoso en su tentativa, culpa fué de sus ideas preconcebidas sobre el sistema del mundo (1).

Pero prosigamos el estudio de los hechos.

La altura de las mareas varía tambien con las declinaciones de la Luna y del Sol; siendo tanto mayor cuanto más próximos al ecuador están ambos astros. Dos veces al año, el 21 de marzo y el 22 de setiembre, está el Sol en el ecuador mismo. Si hácia la misma época, se halla la Luna inmediata al mismo plano, las pleamares son las más altas de todas, y llevan el nombre de mareas de sizigias *equinocciales*, porque la Tierra está entónces en el equinoccio de primavera ó en el de otoño.

Por el contrario, las mareas más bajas tienen lugar hácia los solsticios, si la Luna llega al mismo tiempo que el Sol á su menor ó á su mayor altura meridiana.

(1) Keplero habia sospechado ya que las mareas tenian por causa la tendencia de las aguas del mar hácia la Luna y el Sol. «Si la Tierra cesara, dice, de atraer las aguas á sí misma, todas las del Océano se elevarian hácia la Luna, porque la esfera de atraccion de la Luna se extiende á nuestra Tierra y atrae sus aguas.» Esta opinion de Keplero, que no la llevó más adelante, era cierta. Es curioso verla combatida por Galileo: este grande hombre se admira en su cuarto diálogo sobre los *Sistemas del mundo* de que «entre todos cuantos se han ocupado del maravilloso efecto natural del flujo y reflujo del mar, Keplero, que á la independencia y la penetracion del genio reunia el conocimiento perfecto de los movimientos atribuidos á la Tierra, haya prestado oidos con complacencia á esa soberanía de la Luna sobre el Océano, á propiedades ocultas, á verdaderas puerilidades.» Para Galileo eran las mareas efectos del doble movimiento de la Tierra, y creia poder explicar las variaciones del fenómeno en virtud de las aceleraciones ó retrasos que sufren los movimientos de la Tierra y de la Luna al recorrer el zodíaco.

La ciencia ha dado la razon á Keplero contra Galileo, y tambien contra Descartes, que explicaba las mareas apelando á sus famosos torbellinos. Segun Descartes, «cuando la Luna pasa por el meridiano, el flúido que se halla entre la Tierra y la Luna, flúido que se mueve tambien á modo de torbellino alrededor de la primera, se encuentra en un espacio más reducido, por consiguiente, debe circular más de prisa y además causar una presion en las aguas del mar.» Esta explicacion, segun lo hace notar d'Alembert, adolece de dos defectos; primero, basarse en la teoría de los torbellinos, justamente desechada, y segundo, y más grave, ser contraria á los hechos, porque la presion de que habla deberia rechazar las aguas del mar, y estas aguas descender cuando la Luna pasa por el meridiano, cuando precisamente sucede lo contrario.

A Newton le estaba reservada la gloria de descubrir la verdadera causa de las mareas, como se verá en breve.

Por último, las distancias reales de la Luna y del Sol á la Tierra ejercen tambien su influencia en la altura de las mareas. En igualdad de circunstancias, la altura de una marea es tanto mayor cuanto más cercanos á la Tierra están ambos astros. Así es que las mareas del solsticio de invierno son más considerables que las del solsticio de verano; las de las sizigias mayores en el perigeo de la Luna que en el apogeo.

Tales son las circunstancias generales que caracterizan los movimientos periódicos del mar; pero no debemos olvidar que no son las únicas: la fuerza y la direccion de los vientos, la configuracion y la orientacion de las costas, la profundidad y la extension de los mares, las circunstancias que dependen de los lugares y de los tiempos, son otras tantas influencias múltiples que complican de un modo singular las mareas.

Así por ejemplo, todos sabemos que los mares aislados, como el Caspio, ó poco extensos y en comunicacion con el Océano por estrechos ó pasos angostos, como los mares Negro y Mediterráneo, tienen mareas muy poco perceptibles (1). Las costas opuestas del Atlántico, que se hallan situadas frente á frente, al oeste las unas y al este las otras, tienen mareas muy desiguales. Lo propio sucede en las costas orientales de Asia, en las que hay fuertes mareas, al paso que en la otra orilla del Pacífico y en los archipiélagos oceánicos, el flujo, muy regular, llega á escasa altura.

Circunscribiéndonos á los puertos de Europa, diremos que la intensidad del fenómeno es sumamente variable en ellos, áun tratándose de dos lugares vecinos. Citemos un ejemplo: segun los cálculos de las mareas para 1880 publicados en el *Anuario de la oficina de longitudes*, la marea más fuerte será la que ocurrirá 36 horas despues del plenilunio del 26 de marzo, algo despues del equinoccio de primavera: tendrá lugar el 28.

Si los vientos no contrarian el flujo, la altura de esta marea será: en Brest, de $3^m,40$; en Granville, de $6^m,51$; en Cherbourg, de 3^m; y en el Havre, de $3^m,78$. Hay que advertir que estos números, tan diferentes respecto de puertos bastante próximos, sólo expresan la altura sobre el nivel medio de las aguas, es decir, del que tendrian si las mareas no existieran. Hay que duplicarlos si se quiere tener la altura de la pleamar sobre el nivel de la bajamar, en el mismo dia del año. Así por ejemplo: en el puerto de Granville y en el de San Maló se elevarán las aguas el 28 de marzo á una altura total de 13 metros próximamente. Si el viento llega á favorecer la marea, aumentando su violencia y su altura, habrá motivo para temer grandes desastres.

Hay una diferencia notable entre estas mareas de la costa occidental de Europa y las de las islas del mar del Sur, las cuales apénas suben 30 centímetros. En cambio hay otras mucho más terribles, y entre ellas me limitaré á citar las de la bahía de Fundy, en la Nueva Escocia, que segun dicen, se elevan hasta 30 metros de altura.

La razon de estas diferencias depende, en gran parte, de circunstancias locales. Los puertos de la Mancha experimentan grandes mareas, porque el movimiento de las aguas encuentra un obstáculo en la proximidad de las costas, y cuanto más se penetra en el golfo, mayor es la altura de la marea.

Esta se hace sentir en los rios á una distancia tanto más considerable de su desembocadura, cuanto mayores son la anchura y la profundidad. En el momento de la pleamar, las aguas del rio refluyen, retroceden en su curso, pero esta marea fluvial sólo se efectúa progresivamente y cada vez con mayor retraso sobre la hora de la marea oceánica. Resultan de aquí curiosos fenómenos, conocidos en Francia con los nombres de *mascaret*, *bore* y *barra de oleada* (2).

El *mascaret* se observa principalmente en la época de las grandes mareas equinocciales. Dé-

(1) Segun las observaciones del sabio y malogrado G. Aimé, que estudió por espacio de dos años las ondulaciones del nivel del mar en Argel, la amplitud de la marea luni-solar llega en dicho puerto los dias de sizigias á 88 milímetros. «El lago de Michigan, á pesar de tener 62,000 kilómetros, es la superficie lacustre más pequeña en que se ha notado con precision el regreso regular del flujo y reflujo; segun el teniente Graham, la amplitud de la marea es allí de 75 milímetros.» (LA TIERRA, t. II, por Elíseo Reclus.)

(2) El nombre de *mascaret* era peculiar del rio Dordoña. Arago y Babinet lo aplicaron al mismo fenómeno que se designaba en la desembocadura del Sena con el nombre de *barra de oleada*. En la desembocadura del Amazonas ha recibido el de *pororoca*, onomatopeya del rumor de sus aguas. «Levántase, dice E. Reclus, en tres oleadas sucesivas que llegan en junto de 10 á 15 metros de altura, y las embarcaciones sorprendidas por aquel diluvio repentino corren gran peligro de zozobrar, como en alta mar.»

bil en las aguas profundas, como tambien en los bancos poco cubiertos, lo favorece en su formacion un viento de mar moderado, al paso que un viento impetuoso extiende las aguas disminuyendo su altura. Babinet, que ha observado mucho tan curioso fenómeno, y á quien pertenecen los datos precedentes, ha hecho la siguiente descripcion de él:

«Miéntras que por lo general, y hasta en la extrema desembocadura del Sena, en el Havre, en Honfleur, en Berville, el mar sube por grados insensibles en el momento del flujo y se eleva gradualmente, en la porcion del lecho del rio más arriba y más abajo de Quillebœuf se precipita la primera oleada cual inmensa catarata, formando una ola rotatoria, tan alta como



Fig. 136.—Una playa durante la baja mar

los edificios de la orilla, ocupando toda la anchura del rio, que allí tiene de 10 á 12 kilómetros, derribándolo todo á su paso y llenando instantáneamente la vasta cuenca del Sena. No puede darse nada más majestuoso que esa formidable ola tan formidablemente movible. Cuando se ha estrellado contra los muelles de Quillebœuf, inundándolos con sus salpicaduras, remonta y penetra en el lecho más angosto del rio, que corre entónces hácia su orígen con la rapidez de un caballo á galope. Los barcos varados, incapaces de resistir la acometida de tan furiosa oleada, corren gravísimo riesgo. Las praderas de las orillas, corroidas por la corriente, empiezan *á derretirse*, segun una expresion local, y desaparecen. El lecho del rio se desvia sucesivamente de uno á otro de los ribazos peñascosos que lo encajonan, y finalmente, los bancos de arena y de cieno del fondo se agitan y remueven como las olas de la superficie. No hay nada más asombroso que esas temibles *barras de oleada* observadas á la luz del sol más puro, en medio de la calma más completa y sin que se note el menor indicio de viento, de tempestad ó de tormenta. Los ruidos más atronadores anuncian y acompañan esas gran-

des crísis de la naturaleza, preparadas por una causa eminentemente silenciosa, la *atraccion universal.*»

Basándose Babinet en las investigaciones teóricas de Lagrange y en los recientes experimentos de Russel relativos á la velocidad de las olas en los canales, explica el *mascaret* y todos los fenómenos análogos, atribuyéndolo al obstáculo que opone á la propagacion de las mareas la disminucion progresiva de la profundidad de los rios á partir de su desembocadura. «En efecto, dice, en todas las localidades en que el agua vaya siendo cada vez ménos profunda, las primeras olas, retrasadas por la falta de profundidad, serán alcanzadas por las siguientes, que marchan por un agua más profunda, y estas lo serán á su vez por las que las siguen, de suerte que como las olas que van á la cabeza serán vencidas en velocidad por todas las siguientes, estas últimas caerán á modo de cascada por encima de las primeras, y producirán esa inmensa catarata cuya forma y efectos he descrito más arriba.» *(Estudios y lecturas sobre las ciencias de observacion.)*

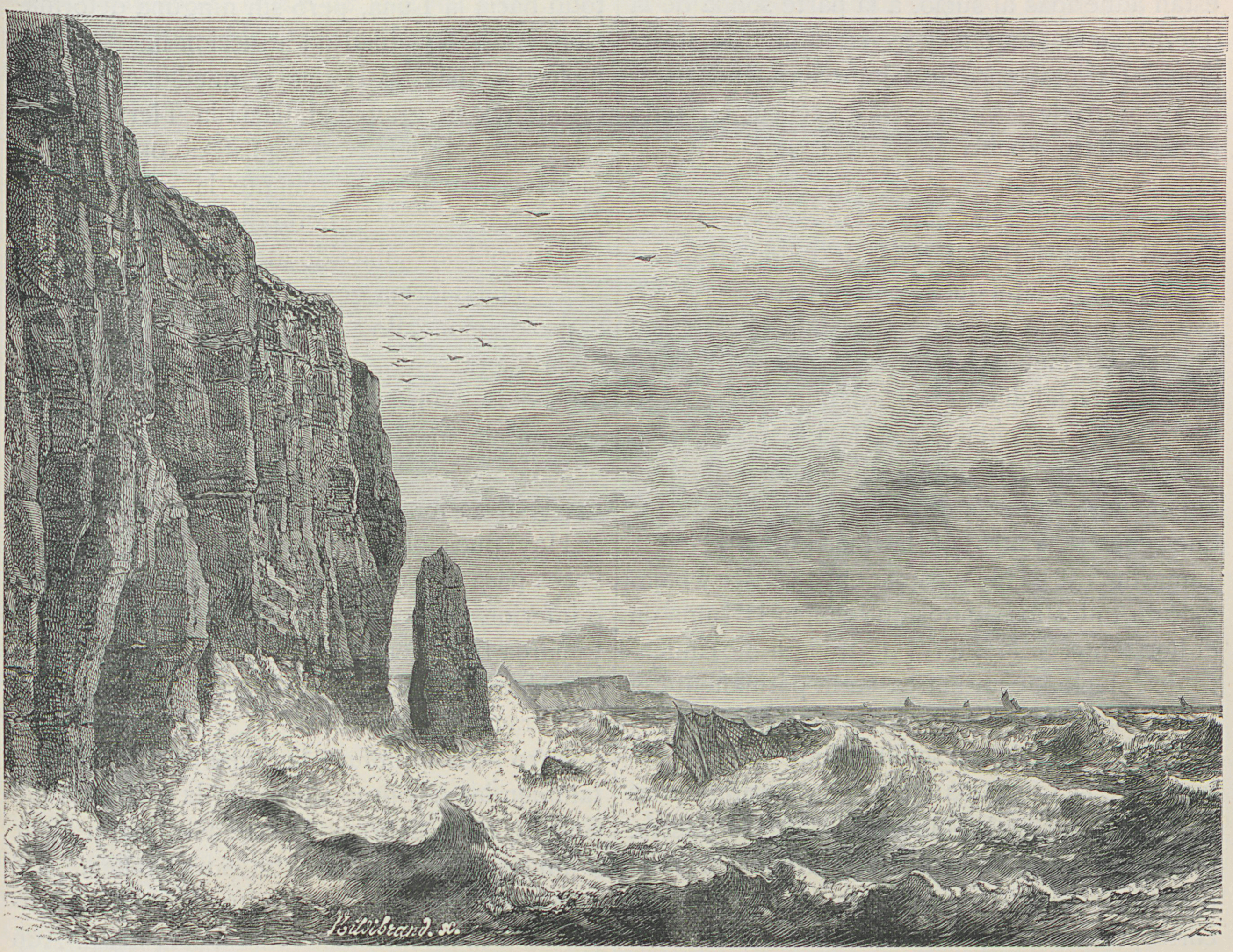


Fig. 137.—Una playa durante la pleamar

Pero ya nos hemos ocupado bastante de los hechos, cuya descripcion detallada necesitaria un volúmen.

Digamos ahora cuatro palabras acerca de las causas de las mareas.

II

TEORÍA DE LAS MAREAS: TIENEN POR CAUSA LA ATRACCION QUE EJERCEN LAS MASAS DEL SOL Y DE LA LUNA EN LAS AGUAS DEL OCÉANO

Consideremos á la Luna aislada y en un momento dado. Reunamos con una línea ideal su centro con el centro de la Tierra: esta línea encontrará la superficie del globo en dos puntos diametralmente opuestos. El uno, más inmediato á la Luna, será el lugar de la Tierra respecto del cual el astro de las noches estará en el zenit; el punto opuesto tendrá la Luna en el nadir. Ade-

más, todos los puntos de la Tierra que tienen la misma longitud que los primeros verán pasar en aquel momento la Luna por su meridiano.

La atraccion de la Luna sobre las moléculas líquidas más próximas contrabalancea en parte la atraccion de la Tierra; y disminuye su gravedad en el sentido de la vertical. Estas moléculas, que por su fluidez é independencia no están adheridas al suelo, á la parte sólida de la Tierra, se elevan pues en virtud de esta atraccion. Lo propio sucede, aunque en menor escala, respecto de las moléculas vecinas, en todo el hemisferio vuelto hácia la Luna, siendo la atraccion tanto más débil cuanto más se alejan dichas moléculas del punto que es como el vértice del hemisferio que mira á la Luna.

Resulta de aquí que la capa líquida que cubre este hemisferio se alarga, se hincha hácia el lado de la Luna, y en vez de conservar su forma esférica, adquiere—guardando por supuesto todas las proporciones,—la de un huevo, geométricamente la de un elipsoide alongado, cuyo eje mayor sigue la direccion del radio vector que reune el centro de la Tierra con el de la Luna (fig. 138). Hay pleamar en el vértice y bajamar en todos los puntos que tienen la Luna en el horizonte. Si la Tierra no tuviera movimiento de rotacion, esta marea seria permanente, y las aguas permanecerian así en equilibrio, ó por lo ménos seguirian el solo movimiento de revolucion de la Luna; las mareas no tendrian pues otro período sino las lunaciones. Mas la Tierra, al girar, presenta á la Luna toda su periferia, de suerte que la onda sigue el paralelo que corresponde á la posicion de nuestro satélite.

Hasta aquí, no es difícil comprender la pleamar y la bajamar por lo que respecta al hemisferio vuelto hácia la Luna; pero ¿en qué consiste que las aguas se hinchan tambien en la extremidad del hemisferio opuesto (1)?

Fácilmente se comprenderá tambien esta similitud.

La atraccion lunar se hace sentir á la vez en todas las moléculas de que se compone la Tierra, pero su energía es tanto más escasa cuanto más apartadas se hallan estas moléculas. Si se ejerciese dicha accion en todos los puntos con igual intensidad, resultaria una desviacion total hácia la Luna, pero sin ninguna deformacion. La desigualdad de atraccion hace que las moléculas más apartadas se queden atrás, que disminuya su gravedad hácia la Tierra, y que toda la capa líquida del hemisferio opuesto á la Luna adquiera precisamente la misma forma que la que está delante de dicho astro.

El problema sometido al análisis matemática indica como forma general del Océano la de un elipsoide alongado en la direccion de los radios de la Tierra que convergen á cada instante en la Luna. Segun J. Herschel, la diferencia entre el semi-eje mayor y el semi-eje menor de este elipsoide es $1^{m},47$; la del elipsoide formado por la atraccion del Sol no pasa de $0^{m},58$.

Hay pues ola ó marea alta lunar cuantas veces pasa la Luna por el meridiano superior ó inferior, es decir, cada 12 horas 25 minutos, y marea baja siempre que dicho astro se halla en el horizonte de un lugar, esto es, en períodos de duraciones iguales.

Pero no sólo influye la Luna en las mareas; tambien las hay producidas por la atraccion del Sol. La masa enorme de este astro daria lugar á inmensos movimientos si su distancia, 400 veces mayor que la de la Luna, no contrabalanceara la intensidad debida á esta masa. Aun cuando las mareas solares son mucho más débiles que las lunares, ora se agregan á éstas, ora las contrarían. Agréganse cuando los dos astros y la Tierra se hallan en la prolongacion de una línea recta, lo cual sucede en las sizigias, es decir, cuando hay Luna llena ó nueva (figs. 139 y 140). Las acciones de ambos astros se contrarían cuando la Luna está en cuadratura ó en ángulo recto con el Sol, y en este caso la marea total ó resultante es mínima (fig. 141).

El cálculo demuestra que la accion luni-solar es tanto más intensa cuanto más próximos

(1) Hay en esto una dificultad, aparente tan sólo, pero que se presenta con bastante frecuencia á la imaginacion de las personas poco familiarizadas con el análisis matemática. Hé aquí cómo solventa esta dificultad J. Herschel, en sus *Outlines of Astronomy:*

«Parece natural, dice, que el Sol ó la Luna levanten con su atraccion las aguas del Océano sobre las cuales se encuentran; pero tambien parece absurdo que la misma causa las levante al propio tiempo por el lado opuesto. El error de esta objecion dimana de no considerar la atraccion del cuerpo perturbador sobre la masa de la Tierra, y sí sólo como si únicamente ejerciera todo su efecto en la superficie del agua. Si la Tierra estuviese absolutamente fija, sujeta en su sitio por una fuerza exterior, y el agua en libertad de moverse, el efecto de la potencia perturbadora produciria sin duda una simple acumulacion vertical bajo el cuerpo perturbador. Pero en realidad no es toda su atraccion la que levanta las aguas, sino la diferencia de sus atracciones sobre la superficie del mar á ambos lados y sobre la masa central.»

al ecuador se hallan ambos astros. De aquí resultan las grandes mareas equinocciales.

Por último, la accion varía en razon inversa del cubo de la distancia; y por lo tanto se comprende que las mareas sean más fuertes cuando el Sol y la Luna están más cercanos á la Tierra.

Para darse cuenta del efecto complejo producido por la combinacion de las dos acciones simultáneas de las masas de la Luna y del Sol sobre las aguas del Océano, basta examinar separadamente el de cada una de ellas.

Para esto supongamos al globo terráqueo cubierto enteramente por las aguas, y admitamos desde luégo que la profundidad del Océano sea uniforme. La accion de la gravitacion de la Luna producirá á cada momento tal deformacion del nivel general, que la superficie del Océano será la de un elipsoide cuyo eje mayor esté en direccion del radio vector que reune los centros de la Luna y de la Tierra.

Así tambien, considerada aisladamente la accion del Sol, producirá un elipsoide del mismo género cuyo eje mayor será más pequeño, puesto que dicha accion es menor, y estará en direccion del radio vector que reune los centros del Sol y de la Tierra.

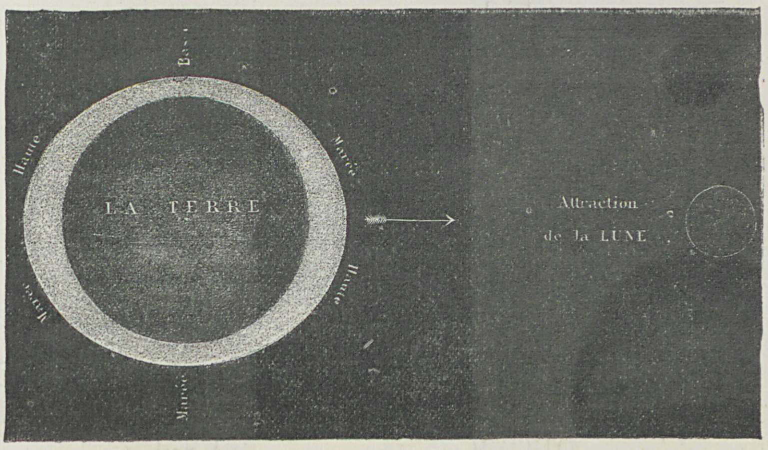


Fig. 138.— Atraccion de la Luna sobre las aguas del mar. Marea lunar simple

Estos dos elipsoides cambian de lugar á cada momento, por una parte, á causa del movimiento de rotacion de nuestro globo, y por otra, á consecuencia de los movimientos relativos de traslacion. Pero tambien se recomponen á cada instante, de suerte que la forma real de la superficie líquida es la resultante de las que cada uno de ellos produciria separadamente.

Ahora es preciso suponer que las dimensiones de cada elipsoide son, así como su posicion, continuamente variables. El elipsoide lunar varía con las distancias de la Luna á la Tierra; sus dimensiones son mínimas en el apogeo y máximas en el perigeo. La misma observacion debe hacerse con respecto al elipsoide de marea solar, relativamente al perihelio y al afelio.

Por lo que hace á la marea total ó luni-solar, compréndese que experimente variaciones complejas, las más importantes de las cuales ocurren en las sizigias, es decir, cuando los dos elipsoides se agregan por decirlo así, y en las cuadraturas, cuando el uno destruye en parte el efecto producido por el otro.

Si ambos astros están en el ecuador ó inmediatos á él, como sucede en los equinoccios, las grandes mareas ó mareas de las sizigias llegarán á su máximum.

Vese pues qué complexidad hay en la combinacion de la accion del Sol y de la Luna sobre las aguas del Océano, áun en la hipótesis de que cubrieran enteramente el globo, y en que, por lo tanto, ningun obstáculo retrasase su propagacion regular.

Sabido es que esta hipótesis no se realiza en modo alguno en la naturaleza. Los continentes y las islas, con los accidentes de sus costas, sus formas variadas y lo distinto de su orientacion, las desiguales profundidades del mar, las corrientes y los vientos, son otros tantos obstáculos que desvian la onda de las mareas ú ola tidal de su marcha regular.

Sin embargo, basándose en la teoría y comparándola con los resultados de numerosas observaciones, se ha llegado á calcular aproximadamente los fenómenos de las mareas en un gran número de puntos de las costas y á indi-

car con anticipacion las horas de la pleamar y bajamar y sus alturas en cada puerto, haciendo por supuesto abstraccion de las causas accidentales que, como los vientos, pueden aumentarlas ó disminuirlas, segun la direccion en que soplen.

No hay que confundir las mareas en su movimiento de propagacion por la superficie de los mares con una corriente marina de la misma intensidad y de igual rapidez. En los fenómenos de las corrientes hay trasporte real y efectivo de las masas de agua, y á decir verdad, son rios en el seno de la masa líquida. No sucede lo mismo con las mareas. La marea es una onda, una ondulacion; la intumescencia de las aguas que constituye la ola tidal se mueve,

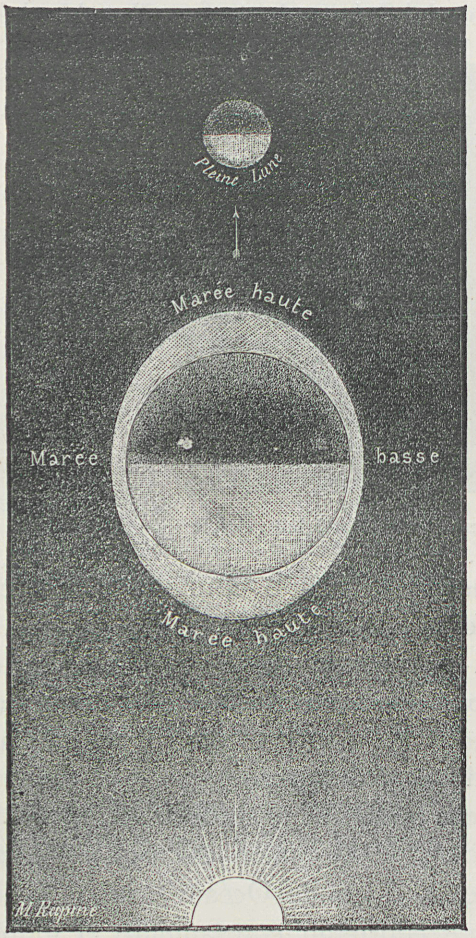


Fig. 139.—Acciones combinadas de la Luna y del Sol sobre las aguas del mar. Marea luni-solar de las sizigias: Luna llena

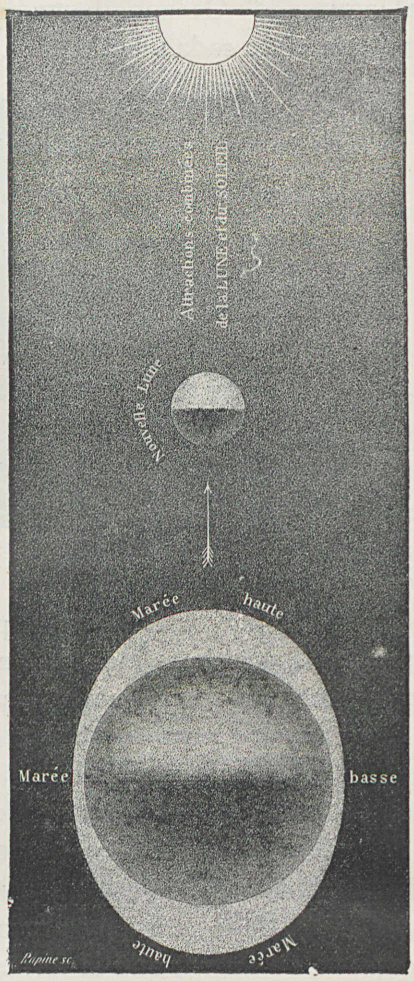


Fig. 140.—Mareas luni-solares de las sizigias: Luna nueva

se propaga, sin que haya corriente efectiva, es decir, trasporte de la masa; las oscilaciones no hacen más que pasar de las moléculas á las moléculas siguientes, y únicamente en el caso de que alguna causa extraña á la atraccion luni-solar influya en el movimiento de la marea, las aguas pueden dislocarse en realidad, como sucede cuando un viento de cierta fuerza sopla en la misma direccion que lleva la marea. Finalmente, en los estrechos tienen forzosamente las aguas ciertos movimientos causados por la resistencia que la proximidad de una costa á otra opone á la libre propagacion de la ola que llega de alta mar. Tal es, en resúmen, el principio de la teoría de las mareas.

Estos movimientos cotidianos é irresistibles están sujetos á leyes inmutables; gracias á la densidad del agua del mar, densidad inferior á la del núcleo sólido cubierto por esta misma agua, están contenidos en estrechos límites. Las leyes naturales bastan para «refrenar el furor de las olas».

III

LAS MAREAS SUBTERRÁNEAS

En los párrafos anteriores nos hemos ocupado solamente de las mareas oceánicas, es

decir, de los efectos de la gravitacion sobre las capas líquidas que rodean las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra; pero ¿no experimentan estos efectos las demás capas de que está formado nuestro globo, así las que constituyen su núcleo interior como las que lo envuelven exteriormente?

Ocupémonos ante todo del núcleo interno.

La teoría de la precesion de los equinoccios y de la nutacion, tal cual la hemos expuesto más arriba, supone que el globo terráqueo es sólido y está dotado de rigidez perfecta. ¿Es efectivamente así?

Hasta estos últimos tiempos, la mayoría de los geólogos y físicos se basaba en el aumento de la temperatura del suelo con la profundidad de las capas hasta donde la mina y la sonda han permitido penetrar al hombre, para deducir que este aumento continúa indefinidamente en proporcion de la profundidad misma.

«En virtud de los experimentos bastante concordantes que se han hecho con el agua de diferentes pozos artesianos, dice Humboldt, parece que el promedio de la temperatura de la costra terrestre aumenta en sentido vertical con la profundidad, á razon de un grado del termómetro centígrado por 92 piés de Paris (30 metros). Si esta ley fuese aplicable á todas las profundidades, una capa de granito estaria en plena fusion á 4 miriámetros de profundidad (4 á 5 veces la altura de la cima más alta de la cordillera del Himalaya).»

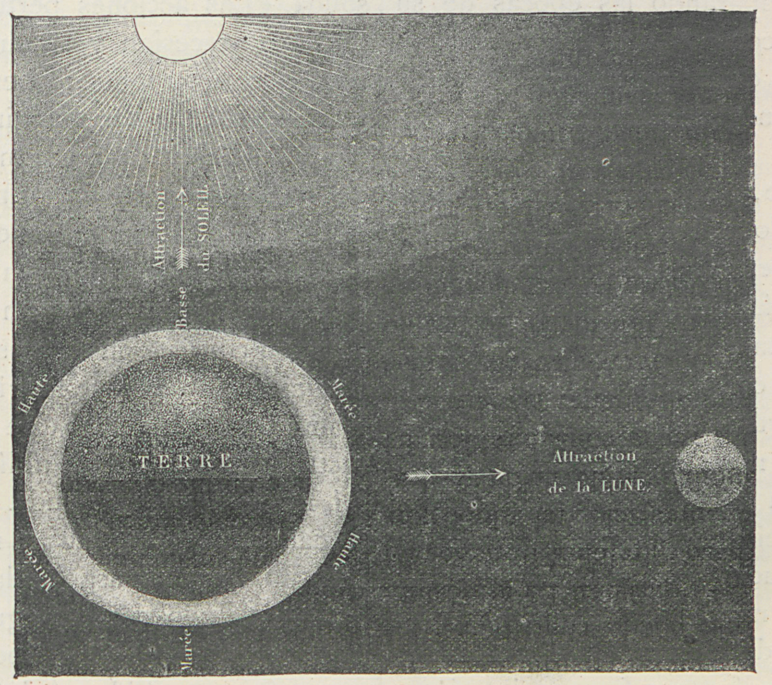


Fig. 141.—Marea luni-solar de las cuadraturas

Segun esto, la temperatura interna debe ser tan elevada, que las materias minerales más refractarias se hallarán en estado de fusion ígnea, y por consiguiente, áun teniendo en cuenta la presion enorme que soportan las capas centrales por parte de las capas superiores, así como la elevacion de temperatura que corresponde á este cambio de estado, se ha venido á considerar nuestro globo como si estuviera formado de un núcleo líquido, rodeado de una tenue envolvente solidificada. Adoptando la cifra de 40 kilómetros como espesor de dicha envolvente, es decir, la 160.ª parte del radio terrestre, el volúmen de la costra sólida apénas seria igual á la 55.ª parte del volúmen del núcleo. Tal seria en esta hipótesis la débil separacion interpuesta entre el suelo y el océano ígneo que constituye la casi totalidad de nuestro esferoide.

Dadas tales condiciones, compréndese que la atraccion combinada de la Luna y del Sol, la cual levanta periódicamente las aguas del mar, no puede dejar de ejercer oscilaciones análogas en la masa del océano interior, y por consiguiente habrá mareas subterráneas así como las hay oceánicas.

¿Se han podido comprobar semejantes oscilaciones? ¿Cómo pueden éstas hacerse ostensibles? Si en efecto existen las ondulaciones de estas mareas subterráneas, claro está que á causa de su presion deben comprimir la superficie interna de la película sólida puesta en contacto con el flúido ígneo, y que las variaciones de esta presion deberán tener los mismos períodos que las mareas oceánicas. A. Perrey, sabio francés que ha compilado numerosas observaciones de terremotos comparando las épocas de su mayor frecuencia con los movimientos de la Luna, ha llegado á deducir que sus épocas de máximum coinciden generalmente con las sizigias.

En su concepto, las mareas subterráneas deben ejercer por lo ménos gran influencia en las conmociones terrestres, ó tal vez sean su causa principal. Elías de Beaumont admitia la probabilidad de esta opinion. Por el contrario, Ampère y Poisson combatian la fluidez del núcleo terrestre, apoyándose precisamente en el argumento de las mareas subterráneas, que á su parecer, habrian roto la corteza sólida por efecto de las variaciones de presion y producido cataclismos perpetuos. Humboldt cree que las oscilaciones de las mareas en cuestion son muy pequeñas. «No se debe atribuir á ellas los terremotos, dice, sino á otras fuerzas interiores más poderosas.»

El sabio inglés Hopkins, sin negar la fluidez primitiva del esferoide terrestre, la cual explica mejor que cualquier otra hipótesis la forma elíptica de nuestro globo, no cree que el espesor de la corteza sólida sea tan escaso como lo supone gran número de geólogos. Basándose en el valor medido de los fenómenos de precesion y de nutacion, asienta que este valor seria mucho más considerable de lo que consignan las observaciones astronómicas, si el espesor de la costra sólida no fuese más que de 40 ó 50 kilómetros. Como en este caso no se ejercerian las acciones perturbadoras del Sol y de la Luna más que en el ensanchamiento ecuatorial, aunque no dejarian de trasmitirse al resto de la corteza sólida, tampoco afectarian á la masa del núcleo flúido. La precesion y la nutacion serian pues mucho más fuertes. Hopkins saca en definitiva la consecuencia de que el espesor de la costra solidificada debe llegar á 800 ó 1,000 millas inglesas (1280 á 1610 kilómetros), es decir $^1/_5$ á $^1/_4$ del radio terrestre.

Pero nuestro malogrado compatriota Delaunay ha refutado esta teoría, poniendo por objecion á los cálculos de Hopkins la viscosidad de la masa terrestre en fusion. Gracias á esta viscosidad, el núcleo es solidario de la corteza y debe ser arrastrado con ella en sus movimientos, miéntras que el sabio inglés admite que el núcleo flúido es independiente de la corteza sólida. «Las acciones perturbadoras que producen la precesion y la nutacion, dice Delaunay, ejercen su influencia en la corteza sólida, propendiendo á hacerla girar alrededor de un eje que se aleja cada vez más del eje en torno del cual giraba en un principio: es un movimiento de rotacion sumamente lento que estas acciones tienden á imprimir á la costra sólida, y que debe combinarse con el que posee ya. La cuestion consiste en saber si el líquido interior participa ó no de este movimiento adicional, ó si únicamente afectará este á la corteza sin arrastrar inmediatamente al líquido consigo. Para mí, no cabe la menor duda. El movimiento adicional debido á las causas indicadas es de tal lentitud, que la masa flúida que constituye el interior del globo debe seguir á la costra que lo envuelve como si el todo no formara más que una masa sólida.» (*Actas de la Academia de ciencias*, 1868.)

Así pues, segun Delaunay, la consideracion de los fenómenos de precesion y nutacion no puede proporcionar datos sobre el mayor ó menor espesor de la costra terrestre.

Vese pues que todavía andan divididos los sabios sobre la cuestion de la fluidez interior de la Tierra y por consiguiente sobre la existencia de las mareas subterráneas. Puede decirse, sin embargo, que, áun en la hipótesis de Hopkins, mejor dicho, áun en el caso de la solidez completa del globo terráqueo desde la superficie del suelo hasta el centro, existen en realidad oscilaciones análogas á las mareas, si bien son demasiado débiles para que se las pueda percibir. Para que sucediera lo contrario, deberia suponerse que el globo es absolutamente rígido y sin plasticidad alguna; pero los experimentos de M. Tresca sobre la licuacion de los cuerpos sólidos prueban que en las sustancias comunes no existe semejante rigidez.

Por lo demás, entre el estado de fluidez que al parecer admiten ciertos geólogos y el estado sólido propiamente dicho hay transiciones, intermedios numerosos. Es muy posible que, á pesar de la elevada temperatura que marcaria la ley de proporcionalidad del calor interno con la profundidad, estén mantenidas las capas líquidas, á causa de la enorme presion que soportan y ejercen unas sobre otras, en un notable estado de viscosidad. Pero un globo sólido, que no es absolutamente rígido, que está dotado de cierta plasticidad, experimenta á causa de la atraccion de ciertos cuerpos exteriores como el Sol y la Luna, oscilaciones periódicas, deformaciones de la masa, de pequeñísima amplitud ó de extraordinaria lentitud, fenómenos todos asimilables á las mareas (1).

IV

LAS MAREAS ATMOSFÉRICAS

Cuanto acabamos de decir acerca de la accion de las masas del Sol y de la Luna en la parte líquida y en la sólida del globo terráqueo, puede aplicarse sin duda alguna á su envolvente gaseosa ó sea á su atmósfera.

Es pues evidente que habrá mareas atmosféricas así como las hay oceánicas. Falta saber cuál es la amplitud de las oscilaciones de la masa de aire que rodea á nuestro planeta, y cómo se dan á conocer estas oscilaciones y se hacen perceptibles á los observadores.

Nuestra situacion en la superficie del suelo, es decir, en el fondo del océano flúido que constituye la atmósfera, no nos permite observar las variaciones de su nivel del mismo modo que observamos las del nivel del mar. Pero claro está que el efecto producido por la atraccion de la Luna y por la del Sol será proporcionalmente análogo al de las mareas del Océano. En los dos extremos del diámetro terrestre dirigido hácia la Luna, la atraccion de este astro debe levantar las capas de nivel de la atmósfera, haciendo que en su conjunto adquieran la forma de un elipsoide alongado. Un efecto parecido, siquiera menor puesto que la accion del Sol es tambien menor que la de nuestro satélite, ocurrirá en la direccion del radio vector que une los centros de gravedad del Sol y de la Tierra: la forma de la atmósfera será la combinacion de estas dos acciones simultáneas. Los pasos de la Luna por el meridiano, las épocas en que la Luna y el Sol están en línea recta, es decir, las sizigias, y por fin, las épocas en que nuestro satélite está en el perigeo, deberán ser los principales períodos del fenómeno, aquellos en que la marea atmosférica llegará á su máximum.

Además, la intumescencia ó hinchazon producida en las capas aéreas recorrerá, como la onda de las mareas oceánicas, toda la circunferencia del globo terráqueo, por efecto de los movimientos combinados de la Luna y de la Tierra.

De aquí resultarán forzosamente variaciones correspondientes en la presion de la atmósfera, conforme podemos conocerlas merced al barómetro. A decir verdad, las oscilaciones del barómetro que proceden de la incesante movilidad de la atmósfera, de la accion del calor y de mil circunstancias locales, hacen muy difícil la averiguacion de los efectos debidos á la sola atraccion luni-solar. Para reconocer y medir las variaciones dimanadas de las mareas atmosféricas, ha sido preciso comparar un crecido número de observaciones. Habiendo reunido de este modo Laplace cerca de cinco mil observaciones barométricas recogidas por Bouvard relativamente á los dias de las sizigias y de las cuadraturas, y á los que preceden y siguen á estas fases, dedujo que el flujo lunar atmosférico no produce en Paris una variacion mayor que $^1/_{18}$ de milímetro en la altura de la columna de mercurio. En el ecuador, donde el flujo llega á su máximum, no alcanza á un milímetro segun la teoría.

Una oscilacion tan débil en la presion de la atmósfera ¿puede ser causa, como se ha sostenido muchas veces, de los cambios de tiempo que, segun se dice, acompañan á las fases de la Luna? Cuesta tanto más trabajo creerlo cuanto que semejante coincidencia no existe; pero el pueblo se empeña con obstinada terquedad en que la renovacion de la Luna ha de ser el

(1) M. G. H. Darwin ha publicado en las *Philosophical Transactions* y en los *Proceedings of the royal Society*, 1879, una serie de interesantes memorias acerca de este asunto, en las que estudia en sus efectos las mareas que sufre un esferoide viscoso por parte de la masa de un satélite; el autor saca de su análisis importantes consecuencias sobre la historia antigua del sistema solar, y en especial sobre la de la Tierra y de la Luna.

preludio de un cambio meteorológico completo.

Muchos meteorologistas se han esforzado en comprobar la exactitud de dicha creencia, tan difundida hoy todavía: han modificado de veinte modos distintos la ley de esta periodicidad, y el autor de cada sistema ha procurado hallar la confirmacion de su propia hipótesis en los registros de observacion. La misma multiplicidad de las reglas dadas acerca de este punto por cada uno de ellos parece probar que la influencia lunar dista mucho de ser incontestable. De todos modos si hay por parte de la Luna una influencia formal sobre el tiempo, no parece que la débil accion ejercida por su masa en la masa de la atmósfera baste para apreciarla (1).

Aparte de la accion directa que las masas de la Luna y del Sol ejercen en la atmósfera, tienen otra indirecta que puede contribuir á los movimientos de la masa gaseosa. La atmósfera descansa sobre una base movible (al ménos en los tres cuartos de la superficie del globo), es decir, sobre el Océano, cuya elevacion y descenso periódicos son á veces considerables. El flujo sube muy poco en alta mar y las variaciones de nivel deben producir en las capas aéreas un efecto insensible; pero no sucede lo propio cerca de las costas, en donde las circunstancias locales y accidentales ocasionan mareas muy fuertes. Tambien Laplace cree poder atribuir principalmente á la elevacion y al descenso periódicos del mar el flujo lunar atmosférico en nuestros climas. Esta era asimismo la opinion de Olbers, quien fijándose en que la pleamar excede á veces de 20 piés en Brest y de 50 en Bristol, añade:

«Tan enormes masas de agua ¿no deben ocasionar algunas variaciones en la atmósfera, tanto más cuanto que parecen influir un poco en la electricidad del aire? Y en efecto, los habitantes de las costas creen haber observado que los cambios de tiempo, de la fuerza y direccion del viento y de las nubes dependen de las mareas.»

V

LAS MAREAS Y LA DURACION DE LA ROTACION DE LA TIERRA

La Luna describe alrededor de la Tierra una órbita que seria invariable si el Sol estuviese á una distancia que pudiera considerarse como infinita. Entónces, obrando la masa del Sol con la misma intensidad en nuestro globo y en nuestro satélite, y siguiendo direcciones paralelas, su accion no ejerceria ninguna influencia perturbadora.

Pero no sucede así. La Luna está en sus conjunciones más próxima al Sol que á la Tierra, en una cantidad que dista mucho de ser despreciable, por cuanto excede de la 400.ª parte de la distancia media. Por efecto de esta diferencia de distancia resultan disminuidas la atraccion más fuerte del Sol sobre la Luna y la gravedad de esta hácia la Tierra. Lo propio sucede en las oposiciones: la Luna está entónces ménos atraida por el Sol que la Tierra; y por consiguiente el efecto producido es tambien una disminucion de la gravedad de la Luna hácia nuestro globo. En las cuadraturas se da el caso contrario, pero el aumento de gravedad que resulta es mucho menor, de suerte que en definitiva, á causa de la accion del Sol, la Luna está como mantenida á una distancia de la Tierra mucho mayor que si dicha accion no existiese. Así pues la velocidad de circulacion de nuestro satélite resulta alterada, disminuida de este modo.

Sin embargo, esta influencia del Sol no seria observable en el curso de las revoluciones sinódicas de la Luna, porque permaneceria constante, si la distancia del Sol á la Luna y á la Tierra fuese invariable. Pero ya se sabe que no es así, que la órbita de la Tierra es una elipse como la de la Luna, y que nuestro planeta dista del Sol en su perihelio casi 1.500,000 leguas ménos que en su afelio. Así pues, en el perihelio es más perceptible la perturbacion causada por el Sol en la órbita lunar; esta órbita parece dilatarse entónces, al paso que en el afelio se contrae. Dicha perturbacion, que se reproduce periódicamente todos los años, lleva el nombre de *ecuacion anual*.

(1) En el corto pero interesante trabajo que ha escrito Olbers sobre la *Influencia de la Luna en las estaciones* hace constar la insignificancia de las variaciones ocasionadas en la altura del barómetro por las mareas atmosféricas. Sin embargo, añade: «Aun cuando estos efectos son muy débiles, no es con todo imposible que las mareas más fuertes de los plenilunios y novilunios predispongan la atmósfera á mareas más considerables. Por tanto no me atrevo á declarar falsa la observacion que algunos físicos pretenden haber hecho, esto es, que hay más tormentas en los plenilunios y novilunios que en los cuartos.» —(*Anuario de la oficina de longitudes para* 1823.)

Vamos á ver ahora una vez más por medio de qué maravilloso encadenamiento de los efectos y las causas están enlazados todos los fenómenos físicos ó astronómicos que en apariencia son los más extraños entre sí. Acabamos de ver que la masa del Sol es la que produce las perturbaciones ú oscilaciones anuales del movimiento de la Luna; y la razon de estas desigualdades estriba principalmente en la forma elíptica de la órbita terrestre ó en su excentricidad. Pero en un capítulo precedente hemos visto que esta excentricidad no es invariable, que la órbita de la Luna cambia de forma con los siglos; en la actualidad y desde hace centenares de miles de años la excentricidad terrestre disminuye, y en un período muy remoto llegará á un valor mínimo que la aproximará al círculo; luégo, tomando este cambio una direccion contraria, la excentricidad irá creciendo de nuevo.



Fig. 142. — Humboldt

Esta variacion secular de nuestra órbita produce otra del mismo período en la Luna. Demuéstrase en efecto que la aceleracion y la aminoracion del movimiento de la Luna (lo que se llama ecuacion anual y que acabamos de describir) no se compensan exactamente; que, si la excentricidad terrestre disminuye, predomina la aceleracion, de suerte que al cabo de un siglo el movimiento medio de la Luna es unos 6″ mayor de lo que deberia ser si la excentricidad fuese constante. Más adelante, dentro de unos 24,000 años, sucederá lo contrario, cuando prevalezca el aumento de excentricidad de la órbita terrestre.

Conforme sucede con frecuencia, la observacion se ha anticipado á la teoría. Halley ha reconocido la *aceleracion secular* de la Luna comparando con las observaciones modernas las observaciones de los eclipses hechas en la antigüedad. No podia haber concordancia entre unas y otras sino con la condicion de admitir que el movimiento medio de la Luna habia ido acelerándose proporcionalmente á los tiempos, en una cantidad igual á 12″ por siglo próximamente.

Faltaba descubrir la causa de esta aceleracion. Hiciéronse varias hipótesis: unos apelaron á la accion perturbadora de los cometas, otros á la resistencia del medio etéreo, y tambien á la trasmision de la fuerza de la gravedad que, en lugar de ser instantánea, deberia ser sucesiva; pero á Laplace le cupo el honor de descubrir la causa verdadera y formular la teoría cuyo principio hemos indicado más arriba y que

enlaza la aceleracion secular de la Luna con las variaciones de la excentricidad de la órbita de la Tierra.

Mas el geómetra inglés contemporáneo, mister Adams, ha probado que el verdadero valor de la aceleracion de la Luna, al ménos en cuanto dependia de esta causa, debia reducirse casi á la mitad, y ser 6 en lugar de 12″ que se requerian para que las antiguas observaciones de eclipses concordaran con las tablas lunares actuales. Suscitóse entónces una prolongada controversia entre astrónomos y geómetras competentes, y de la detenida discusion de esta dificultad, ha resultado que los cálculos de M. Adams son rigurosos. Sin embargo el valor total de 12″ es el único que puede explicar las observaciones antiguas, y por consiguiente la aceleracion secular del movimiento de la Luna no dimana únicamente de las variaciones de excentricidad de la órbita de la Tierra.

De la supuesta concordancia entre la teoría y las observaciones deducia Laplace que la duracion del dia no ha variado desde el tiempo de Hiparco ni un céntimo de segundo (centesimal). Pero como la concordancia no existia, la conclusion tampoco es legítima; y entónces fué cuando á nuestro compatriota Delaunay, que ha hecho tantos estudios sobre la Luna, se le ocurrió si podria explicar un cambio en la duracion del dia sidéreo ó de la rotacion terrestre el exceso de la aceleracion secular de la Luna. Hé aquí su raciocinio que es muy sencillo:

«Fácil es darse cuenta, dice, de la modificacion aparente que experimentaria el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra, si la duracion del dia sidéreo experimentase á su vez un aumento progresivo á consecuencia de una aminoracion en el movimiento de rotacion de la Tierra. Siendo en este caso el dia sidéreo más largo que en la época de las antiguas observaciones, la Luna recorreria durante la mayor duracion de este dia una porcion de su órbita más grande que la que habria recorrido durante el mismo dia si hubiese conservado el valor que tenia antiguamente. De suerte que, para el astrónomo que hiciese abstraccion del aumento de duracion del dia sidéreo, la Luna pareceria recorrer en igual tiempo más camino en su órbita, es decir, pareceria más rápido su movimiento alrededor de la Tierra. Así pues, la consecuencia natural del aumento progresivo de la duracion del dia sidéreo seria una aceleracion aparente del movimiento medio de la Luna.»

Los astrónomos parten precisamente, para medir el tiempo, de la duracion del dia sidéreo que consideran invariable. Así pues, si esta duracion varía en el trascurso de los siglos, la consecuencia indicada por Delaunay es inevitable. Sin embargo, ántes de admitir esta invariabilidad y la explicacion que de ella se sigue para el exceso del valor de la aceleracion secular de la Luna, importaba descubrir la causa capaz de alterar la duracion de la rotacion del globo.

Esta causa existe, segun Delaunay; consiste en la reaccion de la masa de la Luna sobre las protuberancias de las mareas, y en efecto, vamos á ver que esta reaccion propende á disminuir la velocidad de rotacion de la Tierra ó, lo que es lo mismo, á aumentar la duracion del dia sidéreo.

Para simplificar las ideas, consideremos la Tierra como si estuviese enteramente cubierta por las aguas del Océano. La fuerza atractiva de nuestro satélite hace tomar á su superficie de nivel la forma de un elipsoide alongado, cuyo eje mayor *ma* deberia tener la direccion del radio vector TL de la Luna (fig. 143). Las mareas no son otra cosa sino el movimiento periódico de esa intumescencia que da vueltas alrededor del globo siguiendo el movimiento diurno lunar. Sólo que esta desviacion continua de las aguas encuentra resistencias, roces de toda clase, resultando de aquí que el elipsoide alongado formado por el nivel del mar no coincide con el radio vector de la Luna. Hay un retraso ocasionado por las resistencias que se han de vencer, y esta es la causa de que la hora de la pleamar no sea la misma que la del paso de la Luna por el meridiano, sino que ocurra algun tiempo despues.

Por tanto, como el mar no cubre con regularidad todo el globo terráqueo, el movimiento de las aguas está sujeto, segun hemos visto, á otras desigualdades motivadas por causas locales. Pero las mareas no dejan de experimentar en su conjunto el retraso general que acabamos de ver, y que las observaciones han demos-

trado en todas partes. Las cosas ocurren en definitiva como si la Luna estuviera situada detrás de la posicion que ocupa en el cielo, relativamente al sentido de su movimiento diurno. En lugar de dirigirse las dos protuberancias líquidas en la direccion del diámetro AB de la Tierra ó del radio vector lunar TL, están

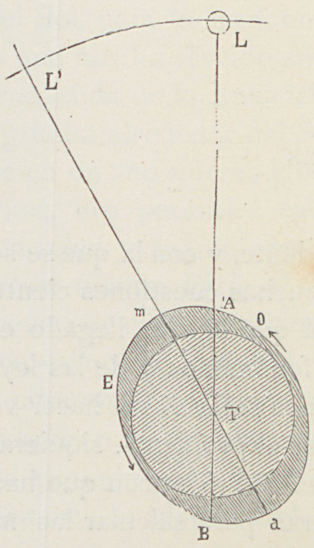


Fig. 143. — Retraso de las mareas lunares

en *ma*, retrasadas tres horas por ejemplo, ó 45° sobre el paso de la Luna por el meridiano (figura 141) que se ha efectuado en L'; se han dirigido hácia el oriente de la Luna.

«Si nos fijamos, dice Delaunay, en el modo cómo se averigua la porcion de la accion lunar que ocasiona el fenómeno de las mareas, veremos que la primera de estas protuberancias está como atraida por la Luna, y la segunda, por el contrario, como rechazada por dicho astro; resulta pues un *par* (1) aplicado á la masa del globo terráqueo y con tendencia á hacerle girar en sentido contrario de aquel en que gira en realidad, par que, segun esto, debe producir un retraso en la rotacion de este globo.»

Por lo demás, para comprender el efecto producido, se puede recordar lo que hemos dicho acerca de la causa mecánica de la precesion de los equinoccios. La diferencia está en que aquí se trata de la protuberancia de las mareas y no del ensanchamiento ecuatorial. Ahora bien, ¿es suficiente esta causa de retraso para explicar el exceso de la aceleracion secular de la Luna? Sí, responde Delaunay. En virtud de un cálculo aproximado se demuestra que basta para esto que cada protuberancia líquida sobre la cual influye la Luna tenga una masa igual á $\frac{1}{4.160,000,000}$ de la masa total de la Tierra, ó sea al equivalente de una capa de agua de un metro de espesor que descansara sobre una base circular de 675 kilómetros de radio; semejante capa, aplicada sobre la superficie del globo terráqueo, ocuparia en él una anchura de unos 12 grados del ecuador. Pues bien, las protuberancias de las mareas son comparables á esta masa.

¿A cuánto asciende el retraso del movimiento de rotacion de la Tierra producido por la accion de la Luna en las protuberancias de las mareas? Segun los cálculos de Delaunay, á *un segundo* en el espacio de 100,000 años. De suerte que en mil siglos, la duracion del dia sidéreo no aumenta más que la 86,400ª parte de su valor. Si el retraso fuese uniforme é indefinido, para llegar á duplicar la duracion del dia sidéreo, seria menester que trascurriesen 8,640 millones de años. ¿En qué época ocurrirá la detencion completa?

Debemos decir que esta detencion completa del movimiento de rotacion de la Tierra es imposible por muchas razones. Desde luégo, cuando la velocidad de rotacion de nuestro globo quede reducida, á causa de esta disminucion progresiva, hasta el punto de ser igual al movimiento de la Luna en su órbita, es decir, cuando la duracion del dia sidéreo llegue á ser unas 27 veces mayor, entónces nuestro globo seguirá presentando á la Luna el mismo hemisferio. Las protuberancias líquidas de las mareas, vueltas siempre hácia nuestro satélite, no tendrán ya el movimiento progresivo que ocasiona actualmente la rotacion. Desde el momento, pues, en que cesara la causa del retraso, permaneceria constante la duracion del dia sidéreo.

Delaunay indica otra razon de la imposibilidad de la detencion completa: «A medida que trascurre el tiempo, dice, y se requiere un gran número de siglos para que se realicen las circunstancias de que acabamos de hablar, la temperatura de la Tierra va disminuyendo. Las

(1) Dase en mecánica el nombre de *par* á todo sistema de dos fuerzas iguales y contrarias que obran en los extremos de una misma línea recta.

aguas del mar acabarán por congelarse, y desde el momento en que el Océano se haya convertido en hielo, dejará de existir el fenómeno de las mareas; desaparecerá la causa del retraso del movimiento de rotacion, y la Tierra seguirá entónces girando con velocidad constante.»

Añadamos para terminar que si el aumento de duracion del dia sidéreo está establecido por la teoría, como parece estarlo por las observaciones, las anteriores cifras no marcan sino aproximadamente su valor; su determinacion exacta sólo puede ser obra del tiempo.

CAPÍTULO VII

MASAS DE LOS CUERPOS CELESTES

I

AVERIGUACION DE LAS MASAS COMPARADAS DEL SOL Y DE LA TIERRA

Francisco Arago se expresa en los siguientes términos al principio del tomo cuarto de su *Astronomía popular*, consagrado en parte á la atraccion universal:

«De cuantos resultados enaltecen á la astronomía moderna, no hay ninguno que llame más la atencion de las personas extrañas á las leyes de la mecánica, que la averiguacion de la masa de los astros: así es que cuando un profesor encargado de analizar las maravillas del firmamento ante un auditorio poco instruido, comete la falta de citar al principio de una leccion los valores numéricos de las masas planetarias; si, por ejemplo, dice que va á probar que el Sol, puesto en el platillo de una balanza y sometido al poder atractivo de la Tierra, necesitaria para estar equilibrado 354,936 globos como el nuestro, amontonados en el otro platillo, apodérase del auditorio un vivo sentimiento de incredulidad, y si éste sigue escuchando al profesor, es sólo para juzgar de su habilidad en desarrollar un sofisma.»

No sabemos si entre las personas que compusieran el auditorio hipotético de que habla Arago, la incredulidad seria tan general como él supone. Pero de seguro que entre los que, dando fe á la ciencia, admitieran el resultado enunciado, serian en muy reducido número los que, á no preceder cierta iniciacion en las ciencias físicas y matemáticas, se hallasen en estado de comprender la posibilidad de semejante demostracion. Esta es una dificultad que no tiene nada de sorprendente, y con la que se suele tropezar en otras muchas cuestiones científicas.

En el punto á que hemos llegado en la exposicion de los fenómenos y de las leyes de la gravitacion, no nos seria difícil hacer ver cómo se puede resolver el problema, siquiera no empleásemos para ello el rigor con que han procedido los geómetras para calcular las masas de los cuerpos celestes.

Segun la teoría newtoniana, la atraccion se ejerce entre dos moléculas materiales, en razon directa de sus masas é inversa del cuadrado de sus distancias. La misma ley rige para el Sol y los planetas, porque, conforme lo ha demostrado Newton, las esferas obran en los puntos exteriores del mismo modo que si las masas de todas las moléculas de que se componen estuviesen reunidas en sus centros.

Es por lo tanto obvio que si se pudieran medir las atracciones de dos cuerpos celestes, por ejemplo del Sol y de un planeta, sobre un mismo cuerpo, estas atracciones, ó sus efectos, reducidos á una misma distancia, tendrian las mismas relaciones que las masas de los dos cuerpos, y así se resolveria el problema planteado.

Pero ¿cómo se podrá medir la atraccion de un astro sobre otro? Sábese en mecánica que la medida de una fuerza constante, como la de la gravitacion, no es otra cosa que la aceleracion, es decir, ora la velocidad adquirida por el cuerpo en el cual obra la fuerza al cabo de la unidad de tiempo ó de un segundo; ora (lo que es lo mismo) el doble del espacio recorrido durante esta unidad de tiempo. Hemos visto que así es como se procede para medir la gravedad en la

superficie de la Tierra. Merced á este mismo método de comparacion pudo Newton reconocer la identidad de la gravedad terrestre y de la fuerza que hace gravitar á la Luna alrededor de la Tierra. Partamos pues de estos principios para ver cuál es la masa de la Tierra comparada con la del Sol.

Empecemos por determinar la accion de la masa del Sol, para lo cual nos valdremos del método que nos ha servido anteriormente para calcular la caida de la Luna hácia la Tierra. La Tierra gravita alrededor del Sol; la órbita que describe en un año sidéreo y cuyas dimensiones conocemos, nos permitirá calcular cuál es la atraccion solar, y cuánto cae la Tierra en un segundo de tiempo hácia el centro del Sol á consecuencia de dicha atraccion. Para ello basta valuar en metros la longitud de la órbita y dividir la cifra encontrada por la de los segundos del año sidéreo: el cociente será el arco descrito en un segundo por nuestro globo en la época de su distancia media al Sol. Una relacion de geometría bien conocida permitirá en seguida deducir la cifra que representa la caida de la Tierra en un segundo. Pues bien, hechos todos los cálculos, se ve que la atraccion del Sol hace caer á la Tierra hácia dicho astro $0^{m},002937$ en cada segundo de tiempo.

Tenemos ya uno de los elementos de la cuestion. Ahora es preciso conocer la atraccion de la Tierra en un punto material situado á la misma distancia. Sabemos que la caida de un cuerpo grave en el vacío es en Paris de $4^{m},9047$ por segundo; mas, para que el resultado sea aplicable á un punto exterior, es preciso considerar á nuestro globo como si fuese esférico y toda su masa aplicada al centro de la esfera, y corregir la accion de la gravedad teniendo en cuenta la que procede de la fuerza centrífuga. Demuéstrase que esto equivale á tomar el valor de la caida de los graves en un punto que tuviera por latitud 35° 16′ y cuya distancia al centro de la Tierra sea igual á 6.364,551 metros (1). En dicho punto la medida de la atraccion terrestre es igual al número 9,81645, lo que equivale á decir que durante el primer segundo de la caida de un cuerpo en el vacío, el espacio recorrido es de unos $4^{m},9082$.

(1) Es un paralelo que pasa algo al Sur de Tánger, Oran, Mostagan y Melilla.

¿Qué espacio seria este á la distancia del Sol? Para responder á esta pregunta, basta recordar que la intensidad de la atraccion decrece en razon inversa del cuadrado de la distancia. De un cálculo muy sencillo resulta $0^{m},000\,000\,009\,0445$ para la caida en un segundo hácia la Tierra de un cuerpo situado á la distancia media del Sol.

Al llegar aquí, sólo nos resta tomar la relacion de los números $0^{m},002937$ y $0^{m},0000000090445$ (el primero de los cuales representa la atraccion solar y el segundo la terrestre) para deducir la relacion de la masa del Sol con la de la Tierra: la division da 324740.

La masa del Sol equivale pues á 324,740 veces la de nuestro globo. A causa de la incertidumbre de los datos, es preferible decir que está comprendida, en números redondos, entre 324,000 y 325,000 veces la masa de la Tierra.

II

MASAS DE LA LUNA Y DE LOS PLANETAS

Tenemos ya pesado el Sol, tomando la Tierra por unidad de peso, ó más bien de masa. Vése que el resultado del método adoptado se basa en el conocimiento de las magnitudes relativas del radio del globo terráqueo y del radio medio de la órbita, por una parte; por otra, en el resultado de las observaciones que han permitido averiguar la longitud del año sidéreo; y finalmente, en el conocimiento práctico de la intensidad de la gravedad en la superficie de nuestro globo, intensidad medida por el espacio que los cuerpos graves recorren en un segundo de caida.

Los mismos datos, excepto el último, existen con relacion á todos los planetas del sistema solar. El cálculo de sus masas requiere pues que se supla de algun modo esta insuficiencia, cosa fácil respecto de todos los planetas que tienen satélites. En efecto, conocidas la dimension y la duracion de las órbitas de estos satélites, es llano calcular la accion de la gravedad del planeta sobre su satélite, su caida hácia él en un segundo de tiempo, como se ha hecho con la Tierra relativamente al Sol.

Así lo hizo Newton con respecto á Júpiter y Saturno, tan luégo como hubo confirmado su gran descubrimiento de la gravitacion. Averi-

guó que la masa de Júpiter era la 1067.ª parte de la del Sol y la de Saturno la 2413.ª Las observaciones más exactas hechas actualmente han dado cifras diferentes, pero el principio de su cálculo sigue siendo el mismo.

Los planetas que tienen satélites son: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, es decir, todo el grupo de grandes planetas, por una parte, y además la Tierra y Marte. En cuanto á los que carecen de satélites, como Mercurio, Vénus y el innumerable grupo de los planetas telescópicos, no ha sido posible determinar sus masas por el método de que hemos tratado anteriormente. Pero las perturbaciones á que están sometidas dependen de la influencia recíproca de estas masas, y las teorías de la mecánica celeste permiten calcular aproximadamente sus valores, cuando se introducen en las fórmulas los datos de las observaciones (1).

Por lo que hace á la Luna, tambien se ha calculado su masa basándose en sus efectos perturbadores sobre nuestro globo. Ya hemos visto que esta masa produce en la posicion del eje de la Tierra el balanceo periódico llamado *nutacion*, y tambien es ella la que, juntamente con la masa del Sol, produce los fenómenos de las mareas. La primera de estas perturbaciones tiene por causa la Luna sola, siendo independiente de la accion del Sol. La segunda es una combinacion de las acciones del Sol y de la Luna sobre las aguas del mar, como ya hemos dicho, pero se ha podido averiguar la relacion que hay entre ambas fuerzas, y ya es sabido que la fuerza de la Luna es 2,1673 veces la del Sol. Por otra parte, la teoría demuestra que las fuerzas atractivas se hallan en este caso en razon de las masas inversa de los cubos de las distancias, lo cual, puesto que son conocidas las distancias del Sol y de la Luna á la Tierra, permite averiguar las relaciones de las masas.

Merced á estos diferentes métodos, se ha llegado á calcular la masa de la Luna con precision cada vez mayor, á medida que se han ido perfeccionando las teorías y las observaciones. La cifra adoptada hoy es $\frac{1}{81,5}$, tomando la masa de la Tierra por unidad; y por consiguiente, se necesitarian más de 81 globos semejantes á nuestro satélite para equilibrar el globo terráqueo, y 26.500,000 para igualar la masa del Sol.

Los astrónomos han llevado todavía más adelante sus indagaciones sobre las masas de los cuerpos celestes; han procurado averiguar las de los satélites de Júpiter, valiéndose de procedimientos análogos á los que acabamos de exponer, esto es, basándose al efecto en las perturbaciones que se han podido observar con seguridad en los movimientos de esos pequeños cuerpos.

El resúmen de tan importantes averiguaciones se halla en el cuadro siguiente, que comprende: 1.° las masas de los planetas comparadas con la del Sol; 2.° las mismas masas, tomando la de la Tierra por unidad; 3.° las densidades de los planetas y del Sol; 4.° por último, la intensidad de la gravedad en su superficie. Fáltanos ahora decir cómo se deducen de los otros estos dos últimos elementos, ó sean la densidad y la intensidad de la gravedad. Procuremos explicarlo en pocas palabras.

Veamos, por ejemplo, cuál debe ser la densidad del Sol comparada con la de la Tierra, sobrentendiéndose que aquí tratamos de la densidad media, es decir, de la que tendrian uno y otro cuerpo si toda la materia de que cada cual está formado se hallase distribuida con uniformidad en su volúmen, en una palabra, si cada uno de ellos fuese homogéneo.

Sea 1 la densidad de la Tierra. Siendo la masa del Sol 324,500 en números redondos, su densidad equivaldria á 324,500 veces la de nuestro globo, si el volúmen del Sol no fuese mayor que el de la Tierra. Pero como su diámetro es 108,556 veces el diámetro terrestre, su volúmen es $(108,556)^3$ ó unas 1.279,000 tan considerable como el de la Tierra. Así pues, en lugar de ser la densidad del Sol 324,500, es $\frac{324,500}{1.279,000}$; y este cociente 0,253. Vése por esto que la densidad se obtiene dividiendo la masa

(1) Hace dos años se creia que Marte no tenia satélites, y se habia calculado su masa por el método de las perturbaciones, siendo su accion particularmente sensible en nuestro planeta. Los cálculos de Le Verrier habian asignado á su masa $\frac{1}{3.000,000}$ de la del Sol. Pero merced al descubrimiento y la observacion de sus dos satélites, hechos por el astrónomo americano A. Hall, se ha podido emplear el primer método. M. Simon Newcomb ha deducido tambien $\frac{1}{3.090,000}$ es decir, la cifra dada por Le Verrier, en el límite de las aproximaciones compatibles con las observaciones y los cálculos astronómicos.

por el volúmen: resultado que, á decir verdad, se deduce inmediatamente de las definiciones de la densidad y de la masa, pudiendo aplicarse á todos los cuerpos celestes cuya masa, distancia y diámetro se conocen, y por consiguiente á todos los planetas principales del sistema.

Con la misma facilidad puede calcularse la intensidad de la gravedad en cada uno de estos cuerpos. Ya hemos visto cómo se deduce la masa, esto es, averiguando la caida de un cuerpo en un segundo á una distancia determinada. Bastará hacer el mismo cálculo tomando por distancia la de la superficie del astro al centro, es decir, una distancia igual al radio del cuerpo considerado como si fuera esférico. Por lo demás, se ve en general que la intensidad de la gravedad en la superficie de los cuerpos celestes es proporcional á las masas é inversa á los cuadrados de los radios, ley general de la gravitacion.

Un cuerpo grave es atraido por la gravedad á la superficie del Sol con una energía que excede 27 veces (exactamente 27,5) á la que ejerce la Tierra sobre un cuerpo situado del mismo modo en la superficie de nuestro globo. Así por ejemplo, un cuerpo que cayera en la superficie del Sol, abandonado á sí mismo en el vacío al cabo de un segundo de caida, adquiriria una velocidad de 270 metros, despues de recorrer en el primer segundo un espacio de 133 metros. El cuadro siguiente marca la intensidad de la gravedad en la superficie de cada planeta principal y tambien en la de nuestro satélite:

MASAS, DENSIDADES Y GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE DE LOS CUERPOS DEL SISTEMA PLANETARIO

Nombres de los astros	MASAS Sol = 1	MASAS Tierra = 1	DENSIDADES Agua = 1	DENSIDADES Tierra = 1	GRAVEDAD Tierra = 1
Sol	1	324,479	1,407	0,253	27,474
Mercurio	$\frac{1}{4.348,000}$	0,075	7,650	1,376	0,521
Vénus	$\frac{1}{412,150}$	0,787	5,032	0,905	0,864
Tierra	$\frac{1}{324,479}$	1,000	5,560	1,000	1,000
Luna	$\frac{1}{26.500,000}$	0,012	3,347	0,602	0,164
Marte	$\frac{1}{3.000,000}$	0,109	3,970	0,714	0,382
Júpiter	$\frac{1}{1,050}$	309,028	1,312	0,236	2,581
Saturno	$\frac{1}{3,530}$	91,931	0,672	0,121	1,104
Urano	$\frac{1}{20,574}$	15,771	1,162	0,209	0,883
Neptuno	$\frac{1}{17,500}$	18,542	1,201	0,216	0,953

MASAS DE LOS SATÉLITES DE JÚPITER

LA MASA de la Tierra = 1	LA MASA de Júpiter = 1	LA MASA de la Luna = 1
I. 0,00535	0,000017328	0,4364
II. 0,00716	0,000023235	0,5838
III. 0,02735	0,000088497	2,2880
IV. 0,01318	0,000042659	1,0745

Todas las cifras que en el cuadro precedente sirven para valuar las masas de los cuerpos celestes de nuestro sistema están en relacion, ya con la masa del cuerpo central, ó bien con la de nuestro globo, lo cual basta para los problemas de mecánica celeste que se les ofrezca resolver á los astrónomos. Mas, por curiosidad, se pueden trasformar todos estos números en kilógramos, por ejemplo, ó en toneladas de 1,000 kilógramos, comparándolos á las masas ó á los pesos de los cuerpos terrestres.

En efecto, conociéndose la densidad media de la materia que forma la Tierra, se puede calcular en kilógramos el peso de nuestro globo. Debe entenderse por este peso la suma

total de las pesas que habria que poner en un platillo de la balanza si fuese posible poner en el otro, partícula por partícula, toda esta materia en las condiciones que hemos tenido ocasion de especificar. Ya hemos visto que este peso excederia de 6,000.000,000.000,000 de toneladas.

El peso de la Luna resultaria ser de

72.000,000.000,000 de toneladas,

y el del Sol de

1,899.000,000.000,000.000,000.000,000 de toneladas!

En vano se esforzaria la imaginacion por formarse una idea de lo que son semejantes cantidades, las cuales, sobre todo la última, no ofrecen más que un interés, el de hacer patente la enormidad de las masas de los astros, cuando se las compara con las de los objetos que nos son familiares.

Es más instructivo comparar la masa del Sol con las masas reunidas de todos los planetas que gravitan en torno suyo obligados á ello por la potencia de su fuerza atractiva. Entónces se ve que esta masa equivale á 740 veces próximamente la de todas las masas planetarias.

No es ménos interesante comparar las densidades respectivas de los globos de los planetas y del Sol. Ante todo conviene observar que los cuatro planetas más próximos al astro solar, los más recientemente formados, son tambien los más densos; al paso que el grupo de los grandes planetas, de Júpiter á Neptuno, se caracteriza por una densidad notablemente menor, inferior á la cuarta parte de la densidad de los primeros. Por lo que hace á la densidad del Sol, excede un poco á la de los grandes planetas. Si estos se han formado, como la teoría cosmogónica de Laplace lo supone, por el abandono y la condensacion de las zonas nebulosas que formaron en un principio la atmósfera del núcleo solar, compréndese que los más distantes estén compuestos de las materias ménos densas, las cuales son las que han dado orígen á los planetas más antiguos y más grandes del sistema: los más inmediatos al Sol, formados de las zonas más bajas y pesadas, debieron de producir los planetas más densos, como así es en efecto.

Supongamos que toda la materia del Sol, de los planetas y de sus satélites estuviese uniformemente diseminada por el espacio esférico que abarca la órbita de Neptuno; el resultado seria una nebulosa gaseosa homogénea, cuya densidad es fácil calcular. Como la esfera de semejante radio seria de un volúmen igual á 300,000 billones de veces el volúmen terrestre, la densidad buscada no seria más que la media billonésima parte de la densidad del agua. La nebulosa solar dilatada de tal suerte seria 400 millones de veces ménos densa que el hidrógeno á la presion ordinaria, el cual es, como nadie ignora, el más ligero de todos los gases conocidos.

Así pues, la teoría de la gravitacion proporciona á la astronomía física muchos datos que arrojan cierta luz, no tan sólo sobre la constitucion íntima de los globos, sino tambien sobre el carácter de la agrupacion de la materia primitiva.

III

DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO.—LOS VULCANOS

Si la teoría de la gravitacion, al facilitar á los geómetras la evaluacion de las masas de los cuerpos celestes, de sus densidades y de la gravedad en su superficie, tiene consecuencias de gran interés para las cuestiones de física astronómica, tiene otras mucho más importantes en lo que se refiere á la astronomía planetaria, esto es, desde el punto de vista del perfeccionamiento de las teorías y de las tablas que representan todas las circunstancias de los movimientos de los cuerpos del sistema. Las masas planetarias son elementos indispensables de estas teorías, y por consiguiente, determinar dichos elementos con mayor precision es un progreso que influye en el resto de la ciencia. Cuando en diciembre de 1874 se trasladaron á varios puntos numerosas comisiones científicas con objeto de observar el paso de Vénus, del cual se deduce la paralaje del Sol, y por consiguiente, la distancia de la Tierra á este astro, no preocupaba tanto á los astrónomos geómetras la cuestion de distancia como la consecuencia relativa á la masa de nuestro planeta. Hase visto, en efecto, que la distancia de los dos astros entra como elemento esencial en el cálculo de estas masas.

Debemos añadir que algunos de dichos as-

trónomos, y de los más eminentes por cierto, como Le Verrier, creian que se podia determinar la masa del Sol por la teoría y la discusion de las observaciones anteriores con más precision que por las observaciones del paso de Vénus; en su concepto, se debia deducir la paralaje solar del valor de la masa, y no esta de aquella. Dicho elemento, ó sea la masa de un cuerpo celeste, tiene grandísima importancia en las indagaciones de mecánica celeste; y las perturbaciones que resultan de las influencias recíprocas de las masas han entrado ya por mucho en los progresos de la astronomía planetaria y de la astronomía sidérea, como vamo

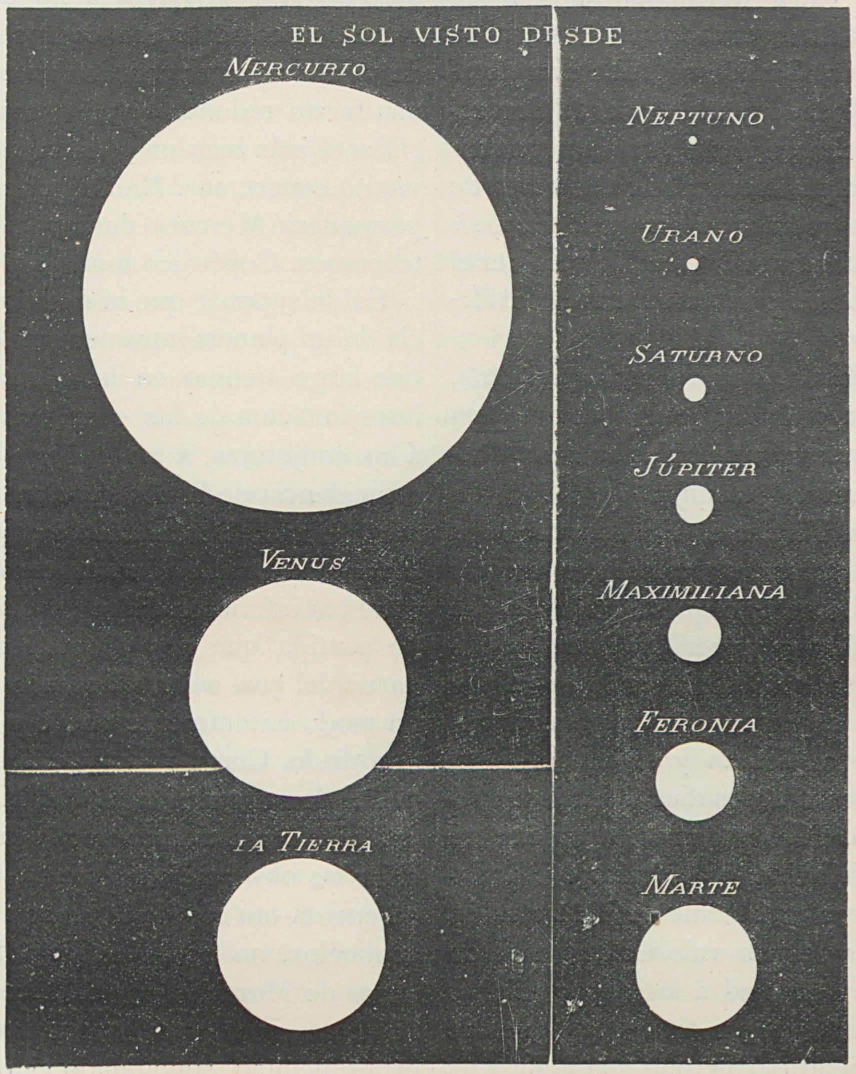


Fig. 144. — El Sol visto desde los principales planetas; comparacion de sus dimensiones aparentes

á demostrarlo valiéndonos de algunos ejemplos.

Una de las más brillantes confirmaciones de la ley de la atraccion universal ha sido sin disputa el descubrimiento del planeta Neptuno. Si era ya un triunfo la solucion del problema que permitia determinar las masas de los planetas conocidos mediante la demostracion de las perturbaciones observadas, y deducir de ellas á continuacion sus posiciones futuras con todas sus desigualdades periódicas ó seculares, no pareció ménos asombroso el descubrir, por medio de perturbaciones no explicadas, ciertos cuerpos no observados hasta entónces, determinando con notable aproximacion los elementos de sus órbitas.

Así sucedió respecto de Neptuno, que, desconocido de los observadores, fué columbrado en setiembre de 1846 por un astrónomo de Berlin, en las regiones del cielo asignadas al nuevo planeta por las previsiones de un cálculo puramente teórico. No podemos trazar aquí la historia de este famoso descubrimiento, que ha formado época en los anales de la astronomía:

tan sólo recordaremos que la comparacion de las observaciones de Urano hechas en el siglo XVIII y en la primera mitad del XIX habia revelado á los astrónomos la existencia de perturbaciones que los planetas conocidos no bastaban á explicar. El astrónomo francés Bouvard habia concebido ya la idea de atribuir estas anomalías á un astro desconocido; pero en aquella época los datos eran insuficientes para abordar la cuestion. Cuando se hubo completado estos datos y quedó perfectamente demostrado que la marcha de Urano sufria perturbaciones que no era posible atribuir á errores de observacion, dos geómetras emprendieron simultánea y aisladamente la tarea de resolver el problema, que puede plantearse en estos términos:

Dadas las perturbaciones de un cuerpo celeste, calcular la masa y la órbita del planeta perturbador, é indicar aproximadamente su posicion en el cielo en una época fija.

Dos sabios, Le Verrier en Francia y Adams en Inglaterra, tuvieron la gloria de conseguir este objeto, siendo notorio que Le Verrier fué el primero en publicar los resultados de su cálculo y en indicar á M. Galle la posicion en que debia hallarse al supuesto planeta. En efecto, observóse al nuevo planeta y se reconoció su movimiento en los últimos dias del mes de setiembre de 1846. Por lo demás, conviene no exagerar la precision de los elementos calculados, que resultaron notablemente inexactos en muchos puntos y cuyos valores se pudieron rectificar en breve merced á las observaciones del nuevo planeta. Pero de todos modos es de admirar la seguridad del método y la belleza de una teoría que hace posibles semejantes descubrimientos.

La hipótesis de la existencia de uno ó de muchos planetas que circulan entre el Sol y Mercurio tiene dos puntos de partida; el uno, que es históricamente el más antiguo, consiste en una serie bastante numerosa de observaciones de pasos de ciertos puntos negros por el disco del Sol, en condiciones de aspecto, movimiento y duracion que no permitian confundir estos puntos con manchas solares. Desde mediados del siglo pasado se habian hecho más de treinta observaciones de este género sin que se les diera gran importancia; en todo caso, no habian sido objeto de una observacion profunda. Los astrónomos parecian más bien inclinados á considerar estos pasos como de cometas, lo cual puede ser cierto con respecto á algunos. Mechain decia en 1804, con motivo de una observacion hecha en 1798 por el caballero de Angos: «¿Acaso no deberia contarse entre los cometas ese cuerpo observado más de veinte minutos con dos anteojos, y que tiene una forma redonda y un movimiento propio? ¿O será más bien un planeta inferior que todavía no conocemos? Nadie ignora cuánto tiempo permaneció Mercurio desconocido, áun de los astrónomos. Copérnico murió sin haberlo visto.»

Es de suponer que la cuestion de la existencia de un planeta intramercurial hubiera subsistido largo tiempo en la misma vaguedad y la interpretacion de las observaciones entregada á las conjeturas, á no haber sido por la feliz coincidencia de la observacion hecha en 1859 por el doctor Lescarbault de Orgères, y la publicacion por Le Verrier de su teoría de los planetas inferiores. Este es el segundo punto de partida que nos proponíamos indicar, y á partir del cual se ha planteado el problema de un modo enteramente nuevo y sobre todo más apropiado. Cuando Le Verrier se dedicó á estudiar los movimientos de Mercurio, se vió detenido largo tiempo por la dificultad de conciliar las observaciones con la teoría; teniendo en cuenta tan sólo la influencia de los planetas conocidos, no podia explicarse los frecuentes pasos de Mercurio por el disco solar observados hasta nuestros dias; en vano trató de obviar esta dificultad, suponiendo cierta elipticidad en la masa del Sol, ó bien una resistencia mayor del éter, ó finalmente la accion de una atmósfera solar que se extendiera hasta Mercurio y estuviese animada de un movimiento más rápido que el planeta. El ilustre geómetra llegó sin embargo á reconocer que la discordancia entre la teoría y las observaciones desaparecia con la condicion de aumentar en 38″ el movimiento secular del perihelio de Mercurio, en cuyo caso la teoría de los pasos de este planeta por el Sol seria superior en exactitud á las mejores teorías astronómicas.

¿Era legítima semejante correccion?

Menester era justificarla, con objeto de evitar

la inculpacion de correccion *empírica* que le dirigian algunos sabios. En una palabra, era preciso buscar su explicacion física. Esto fué lo que hizo Le Verrier atribuyendo el aumento del perihelio de Mercurio á la accion de algun ó algunos cuerpos planetarios desconocidos, interpuestos entre él y el Sol.

«Consideremos, decia, para fijar mejor nuestras ideas, que entre Mercurio y el Sol hay otro planeta, y como no hemos notado en el movimiento del nodo de la órbita de Mercurio una variacion semejante á la del perihelio, figurémonos que el supuesto planeta se mueve en una órbita poco inclinada sobre la de aquel. Admitamos tambien, dada la indeterminacion del problema, que la órbita sea circular. Debiendo el planeta hipotético imprimir al perihelio de Mercurio un movimiento secular de 38″, resulta entre su masa y su distancia al Sol una relacion tal, que á medida que esta se disminuye hay que aumentar aquella y recíprocamente. Para una distancia algo inferior á la mitad de la distancia media de Mercurio al Sol, la masa buscada seria igual á la de Mercurio.»

La observacion del paso de una mancha negra y redonda por el disco del Sol, que el doctor Lescarbault hizo en Orgères el 26 de marzo de 1859, y que este describió poco despues de la publicacion del trabajo de Le Verrier, vino á confirmarlo en todas sus partes. Sin embargo, la teoría no permitia decidir si habia uno ó muchos planetas; y áun era posible que la accion reconocida la produjese una serie de corpúsculos ó un anillo de asteroides que circulase entre el Sol y Mercurio.

Así pues, Le Verrier llegaba á deducir, por medio de la teoría, la existencia de nuevos cuerpos planetarios, del propio modo que por ella habia logrado treinta y cuatro años atrás ensanchar el dominio real de la accion solar descubriendo á Neptuno, cuya existencia le habian revelado las perturbaciones que el planeta, hasta entónces desconocido, ejerciera anteriormente en los movimientos de Urano. El interés del problema es el mismo en ambos casos. Trátase de saber si la teoría de la gravitacion newtoniana, que ha servido para explicar sucesivamente todas las anomalías aparentes, todas las discordancias entre las observaciones y los cálculos, puede invocarse legítimamente en lo que respecta á las desigualdades del movimiento de Mercurio. La mecánica celeste, considerada en el hecho de presentar la teoría de los movimientos planetarios, es el monumento científico más sorprendente de los tiempos modernos; es la firmísima base de toda la astronomía especulativa; y si, como todas las ciencias positivas, no puede prescindir de la comprobacion de las observaciones, no por eso deja de ser admirable el verla llegada á tal grado de perfeccion, que la teoría permite anticiparse á las mismas observaciones y deducir la existencia positiva de cuerpos, de astros, hasta entónces desapercibidos.

Desde la observacion hecha por el astrónomo americano Watson, podemos considerar como cierta la existencia de algunos planetas que circulan entre el Sol y Mercurio, sospechada ya por las múltiples observaciones de pasos de puntos negros por delante del astro solar, por más que dicha existencia no tenga el mismo carácter de certidumbre que la de Neptuno. Durante el eclipse total del 29 de julio de 1878, Watson vió á 2° del Sol un astro de cuarta magnitud cuya posicion á la hora del fenómeno no coincidia con la de ninguna estrella conocida, y que fué observado tambien desde otro punto por el astrónomo Swift. El mismo Watson ha visto en las mismas circunstancias otra estrella de segunda magnitud, y despues de una discusion profunda, apénas es permitido dudar que los dos astros así descubiertos no sean dos planetas intramercuriales, dos Vulcanos.

Así pues, léjos de invalidar las perturbaciones planetarias ó las variaciones seculares ó periódicas que afectan los elementos de las órbitas la ley de la gravitacion newtoniana, la confirman de un modo tan brillante y tan continuo que no puede caber duda sobre su realidad y universalidad, á lo ménos en el mundo de los planetas y de sus satélites, y áun pudiéramos decir en el mundo solar.

En efecto, además de los astros que componen la familia planetaria, y cuyos movimientos están regidos hasta en sus menores detalles por esa gran ley de la naturaleza, hay otra categoría de cuerpos celestes sometidos á la misma fuerza de la atraccion universal: estos cuerpos son los cometas. Pronto hará dos siglos

que creyendo reconocer Halley un solo y mismo astro en las apariciones sucesivas de los cometas de 1531, 1607 y 1682, predecia su regreso para el año 1758 y atribuia las desigualdades advertidas en sus períodos sucesivos á causas físicas semejantes á las que perturban los movimientos de Júpiter y Saturno. Sábese que Clairaut y Lalande precisaron la prediccion de Halley, calculando el retraso que sufriria el regreso del famoso cometa á consecuencia de las influencias de los dos planetas citados, retraso que, segun las laboriosas indagaciones de los dos astrónomos, auxiliados por la señorita Hortensia Lepaute, debia ser de 618 dias, 100 de ellos debidos á la accion de Saturno y 518 á la de Júpiter. El cometa volvió al perihelio el 13 de marzo de 1759, con una anticipacion de 32 sobre la época así prefijada.

Desde entónces ha vuelto á aparecer el mismo cometa en 1835. Pero la teoría de la atraccion habia hecho tales progresos en estos tres cuartos de siglo, que Damoiseau y Pontecoulant pudieron calcular con exactitud casi matemática la época del regreso del cometa; en esta ocasion no hubo tres dias de diferencia entre los resultados del cálculo y los de la observacion.

Bástanos este ejemplo de la aplicacion de la ley de la gravitacion á los movimientos de los cometas, aunque los anales de la astronomía contienen otros ciento.

Está pues probado por la observacion, como la induccion y la analogía permitian preverlo, que la atraccion recíproca en razon de las masas é inversa á los cuadrados de las distancias, es la ley comun de todos los cuerpos que circulan en los límites del mundo solar, más allá de la órbita de Neptuno y hasta en las profundidades donde se hunden los cometas, cuyos períodos se cuentan por centenares, por millares de siglos. Réstanos demostrar que esa ley obra del propio modo en los sistemas del mundo sidéreo.

IV

LA GRAVITACION EN EL MUNDO SIDÉREO

Entre las innumerables estrellas de que está sembrado el cielo hay algunas que examinadas con anteojos de cierto alcance, presentan dos ó muchos puntos luminosos en lugar de uno solo, por lo cual se les ha dado el nombre de *estrellas dobles ó múltiples.*

En cierto número de dichas estrellas se han reconocido verdaderos sistemas de dos soles que giran uno en torno de otro, ó mejor dicho, que circulan alrededor de su centro de gravedad comun. Obsérvese que decimos de *su centro de gravedad;* porque, en efecto, es sumamente probable que la gravitacion sea la fuerza que retiene á estos astros en sus órbitas respectivas. Se han estudiado minuciosamente los movimientos de una de las estrellas de cada pareja alrededor de la otra, reconocido la periodicidad de estos movimientos, y calculado con mayor ó menor aproximacion los elementos de sus órbitas. Los astrónomos han tomado como punto de partida de estos cálculos la hipótesis del movimiento elíptico, suponiendo que las componentes de las estrellas dobles están sometidas á las leyes de Keplero, en una palabra, han considerado sus movimientos como si los regulara la ley de la gravitacion. Pues bien, en los límites de los errores de observacion, la concordancia entre esta y la teoría ha parecido todo lo satisfactoria posible.

Parece pues sobremanera probable que la fuerza de atraccion no sea peculiar de nuestro mundo, sino que alcanza tambien á las profundidades del espacio hasta esos lejanos sistemas cuya luz necesita años enteros para llegar hasta nosotros. Otra clase de testimonio, análogo al que se hizo notar en el descubrimiento de Neptuno, viene tambien en apoyo de esta generalizacion. Entremos con este motivo en algunos detalles, que tomaremos, con permiso del lector, de nuestra obra titulada *El Cielo.*

«Ciertas perturbaciones observadas en las posiciones y movimientos de Sirio habian inducido á Bessel á sospechar la existencia de un cuerpo perturbador que el telescopio no habia podido revelar todavía, y al que por esta razon consideraba como astro opaco, de naturaleza planetaria. En 1851, Peters discutió, teniendo en cuenta los cálculos de Bessel, un gran número de observaciones de Sirio, deduciendo en conclusion que era posible explicar las variaciones periódicas reconocidas si se admite que la estrella describe en cincuenta años una elipse cuyo semi-eje mayor visto desde la Tierra subtendiese un án-

gulo mayor de 2",4. Valiéndose once años despues el astrónomo americano Clarck de un anteojo de 47 centímetros de abertura, columbró la compañera de Sirio, cuyo ángulo de posicion y distancia concordaban con la órbita calculada

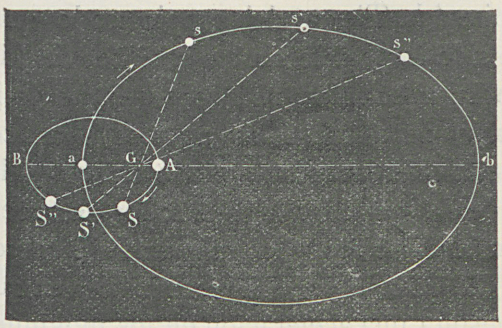


Fig. 145.—Órbitas descritas por las componentes de un sistema binario alrededor del centro de gravedad comun. (Relacion de las masas = 3 : 1.)

por Peters. J. Chacornac y Lassell vieron á su vez, el primero en Paris y el segundo en Malta, el astro adivinado por Bessel; por consiguiente, no era un cuerpo oscuro, segun lo supusiera este último astrónomo á causa de la imposibilidad en que habia estado de verlo.

»Un descubrimiento semejante se ha hecho con respecto á Procion. El estudio del movimiento de esta hermosa estrella, con arreglo á las numerosas observaciones hechas en Europa y América, ha inducido al doctor Auwers á representar sus variaciones de posicion mediante una órbita casi circular que, en su concepto, debe describir Procion en unos cuarenta años (39ª,866) en un plano perpendicular al radio visual, siendo el de la órbita igual á 0",98. Struve ha descubierto y observado en 1873 y 1874 la compañera hasta entónces desconocida, cuya accion habia producido las perturbaciones observadas.

»Esta comprobacion, en virtud de la observacion, de la existencia de astros desconocidos, existencia demostrada y prevista por la sola teoría, es de la mayor importancia. En efecto, las indagaciones de Bessel, Peters y Auwers estaban basadas en la hipótesis de que las leyes de la gravitacion son en los sistemas sidéreos las mismas que en el solar, y que, por lo tanto, los cuerpos vecinos ejercen unos sobre otros atracciones que les hacen describir, con arreglo á las leyes de Keplero, órbitas elípticas alrededor de su centro de gravedad comun.

»Por consiguiente, repetiremos aquí lo que hemos dicho al hablar de las órbitas de las demás estrellas dobles. Si las posiciones sucesivas de los satélites supuestos en un principio y luégo descubiertos concuerdan con las que la teoría indica, la hipótesis resulta justificada. Pues bien, hasta ahora se ha podido considerar como positiva esta concordancia, dentro de los límites de los errores que forzosamente se cometen en mediciones tan delicadas y tan difíciles. Con estas reservas, es permitido tener por realizada la esperanza expresada por W. Struve hace treinta años en su notable Memoria sobre las estrellas dobles.

«Si las leyes de la atraccion universal, decia, »son el descubrimiento más admirable de cuan»tos ha hecho la inteligencia humana en el »trascurso de millares de años, estamos muy »cerca de poder determinar si esas leyes per»tenecen solamente al sistema solar ó si son »comunes al universo entero. La astronomía se »encamina, pues, hácia una época, en la que se »hará patente que la mecánica celeste no se li-

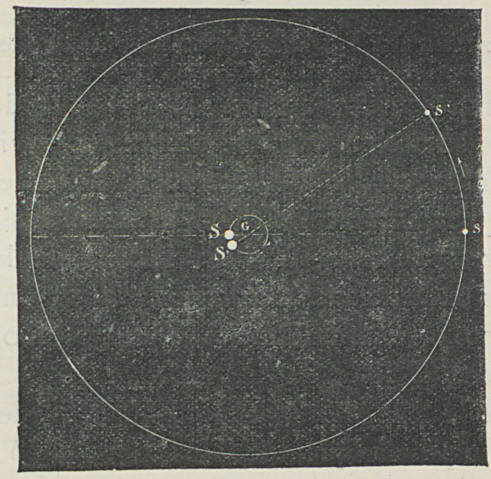


Fig. 146.—Órbitas descritas por las componentes de una estrella doble alrededor del centro de gravedad del sistema. (Relacion de las masas = 13 : 1, como sucede con Procion.)

»mita á los fenómenos del sistema solar, sino »que puede tambien aplicarse á los movimientos »de las estrellas fijas.» *(Dictámen sobre las medidas micrométricas de las estrellas dobles, etc.)*.

»Si la gravitacion dirige los sistemas de estrellas dobles y múltiples, resulta de ello una consecuencia de sumo interés. Debe ser posible calcular la masa de las estrellas cuya distancia se conoce, comparándola con la de nuestro propio Sol. Entre los sistemas cuyos movimientos se han calculado y cuyas paralajes se han

determinado, tenemos cuatro de dichas estrellas, Sirio, la 61.ª del Cisne, *alfa* del Centauro y *p* de Ofiuco, cuyas masas es posible valuar aproximadamente. Así, se ha deducido que las dos estrellas de la 61.ª del Cisne tienen juntas algo más del tercio de la masa del Sol (0,349), admitiendo 0″,374 para la paralaje y 452 años para el período de revolucion. Suponiendo, como autoriza á creerlo la casi igualdad de su brillo, que ambas tienen las mismas dimensiones y masa, cada una de ellas seria la sexta parte de la masa solar. Las masas reunidas de las dos componentes de *alfa* del Centauro son iguales á 0,398, cerca de los cuatro décimos de la del Sol. Así pues, por este concepto, estos dos sistemas son inferiores al nuestro. Pero no sucede lo propio con 70 *p* de Ofiuco; admitiendo que su paralaje es, segun Krüger, 0″,162, la masa de este magnífico sistema seria 3,4, unas tres veces y media la del Sol. Por último, Sirio debe de ser algo menor, y su masa equivaldrá á 3,125, segun los cálculos de Wilson.»

V

TRASMISION INSTANTÁNEA DE LA GRAVITACION

La gravitacion que, segun acabamos de ver, ejerce su accion en todas las regiones visibles del universo, ¿se trasmite instantáneamente á cualquier distancia ó bien esta trasmision es progresiva, como por ejemplo la de la luz, cuyas ondulaciones recorren en un segundo de tiempo el enorme intervalo de 300,000 kilómetros?

Laplace se planteó á sí mismo esta cuestion, y hé aquí en qué términos la resolvió en su *Exposicion del sistema del mundo:*

«No disponemos, dice, de medio alguno para medir la duracion de la propagacion de la gravedad, porque tan luego como la atraccion del Sol ha llegado á los planetas, este astro continúa obrando sobre ellos, como si su fuerza atractiva se comunicase en un instante á los extremos del sistema planetario; por consiguiente no se puede saber en cuánto tiempo se trasmite á la Tierra, del propio modo que hubiera sido imposible sin los satélites de Júpiter y sin la aberracion reconocer el movimiento sucesivo de la luz. Pero no sucede así con la pequeña diferencia que puede existir en la accion de la gravedad sobre todos los cuerpos, segun la direccion y la magnitud de su velocidad. El cálculo me ha permitido ver que de ella resulta una aceleracion en los movimientos medios de los planetas alrededor del Sol y de los satélites alrededor de sus planetas. Yo habia ideado este modo de explicar la ecuacion secular de la Luna, cuando creia con todos los geómetras que era inexplicable en las hipótesis admitidas sobre la accion de la gravedad. Deducia yo que si dimanaba de esta causa, para sustraer á la Luna enteramente al influjo de su gravedad hácia la Tierra, era preciso suponerla dotada de una velocidad hácia el centro de nuestro globo por lo menos *siete millones de veces mayor que la de la luz* (1). Siendo hoy perfectamente conocida la verdadera causa de la ecuacion de la Luna, estamos seguros de que la actividad de la gravedad es todavía mucho mayor. Esta fuerza obra pues con una velocidad que podemos juzgar infinita: debiendo deducir de ello que la atraccion del Sol se comunica en un instante casi indivisible á los límites del sistema solar.»

(1) Si esta cantidad expresara la verdadera velocidad de la trasmision de la fuerza de la gravitacion, se propagaria en 15 segundos hasta la estrella más próxima á nosotros, por ejemplo, hasta *alfa* del Centauro. La luz invierte tres años y medio en recorrer esta distancia.

CAPÍTULO VIII

¿QUÉ ES LA GRAVITACION?

I

IDEAS DE NEWTON SOBRE LA ATRACCION

Despues de haber enumerado los principales fenómenos de la gravedad, y expuesto las leyes en virtud de las cuales se hacen patentes, ya en la superficie de la Tierra, ya en el interior del globo ó bien en la atmósfera; despues de haber demostrado la identidad de su principio con el de los movimientos de los astros, así en nuestro sistema solar como en los sistemas sidéreos que el telescopio descubre en el seno de los cielos, ocúrrese inevitablemente una pregunta:

¿Qué es la gravedad, qué la gravitacion ó atraccion universal?

Fácil nos seria pasar adelante respondiendo que la cuestion planteada de esta suerte no es del dominio de la ciencia, la cual se da por satisfecha con haber llegado á conocer, á medir los efectos de la causa que ha recibido el nombre de gravedad. Conócese una fuerza tanto como puede serlo si sus efectos están claramente indicados por la definicion misma, si todas las circunstancias de los fenómenos son consecuencias necesarias del principio, si la observacion experimental y la teoría concuerdan siempre.

Esto es muy cierto; y considerándolo así, nada tendríamos que añadir á los capítulos precedentes, no abrigando el propósito de abordar esa cuestion de metafísica que tendria por objeto determinar la *esencia* de la gravitacion, ó segun el lenguaje escolástico, averiguar lo que la gravitacion es *en sí*.

Pero podemos acometer de otro modo la solucion del problema, como la han acometido varias veces lo mismo los sabios de los dos últimos siglos que los contempóraneos. Se ha reflexionado si la gravitacion seria un caso particular de una fuerza más general, ó lo que es casi lo mismo, si tendria con tal ó cual fuerza física una correlacion que permitiera considerar á una y otra como efectos de una misma fuerza. Así por ejemplo, ¿no existirá una conexion parecida entre la gravedad y la electricidad? ¿No estará relacionada la gravitacion con el movimiento ondulatorio del éter? Las ondas que producen la luz y el calor radiante, ¿no pueden tambien explicarnos los fenómenos de la gravedad?

Digamos desde luego que hasta el presente solo se ha iniciado muy ligeramente una teoría de esta naturaleza; pero tal vez no esté de más el dar una idea de estos conatos, aunque sólo sea para que se comprenda cuán lejos estamos aún de la solucion del problema. Al propio tiempo aprovecharemos la ocasion para disipar algunas ideas erróneas; de esas que tan fácilmente se abren paso en la imaginacion á causa de la ambigüedad de ciertas palabras.

Por esto solemos formarnos una falsa idea de la atraccion. Sin embargo, cuando Newton se valia de esta palabra, tenia mucho cuidado de prevenir al lector contra una interpretacion que hubiera asemejado la causa de los fenómenos de gravitacion y de gravedad á las *cualidades ocultas* de los filósofos antiguos. Véase lo que dice en su inmortal obra titulada *Principios matemáticos de la filosofía natural:*

«Entiendo por la palabra *atraccion* el esfuerzo que hacen los cuerpos para acercarse unos á otros, ya resulte este esfuerzo de la accion de los cuerpos que se buscan mutuamente ó que se agiten uno á otro con sus emanaciones; ó bien proceda de la accion del éter, del aire ó de cualquier otro medio, corpóreo ó incorpóreo, que impela de un modo cualquiera á todos los cuerpos que flotan en él, hasta llegar á reunirse.»

Y en otra parte añade:

«Hasta aquí me he valido de la fuerza de la gravitacion para explicar los fenómenos celestes y los del mar; pero en ninguna parte he asignado la causa de esta gravitacion. Dicha fuerza dimana de alguna causa que penetra hasta el centro del Sol y de los planetas, sin perder nada de su actividad; obra segun la cantidad de la materia, su accion se extiende por todas partes á distancias inmensas, decreciendo siempre en razon doble de las distancias. Todavía no he podido deducir de los fenómenos la razon de estas propiedades de la gravedad, y ni siquiera formo hipótesis.....»

Hablando Newton, en la Cuestion XXXI de la *Optica*, de las potencias atractivas, como el magnetismo, la electricidad, la gravedad, hace adrede la misma reserva diciendo:

«No examino aquí cuál puede ser la causa de estas atracciones; lo que yo llamo *atraccion* puede ser producido por impulso ó por otros medios que desconozco. No me valgo de la palabra *atraccion* sino para significar en general una fuerza cualquiera, en virtud de la cual los cuerpos propenden á reunirse, sea cualquiera la causa; porque en los fenómenos de la naturaleza debemos aprender que los cuerpos se atraen recíprocamente y cuáles son las leyes y propiedades de esta atraccion, ántes de investigar la causa que la produce.»

Nadie ignora que Newton consideraba la luz como una materia *sui generis* que se propagaba en línea recta en los medios homogéneos, y que en su concepto los espacios celestes tan sólo oponian una resistencia nula ó insensible á los movimientos de los astros. Y sin embargo, no creia que estos espacios estuviesen absolutamente vacíos; ántes al contrario, los suponia llenos de un medio al cual da el nombre de *medio etéreo* ó *éter*, atribuyéndole precisamente las cualidades que hoy le conceden los físicos para explicar los movimientos de la luz. Parécele probada la existencia de tal medio, entre otros experimentos, por uno que consiste en hacer el vacío en un globo que tiene en su centro la bola de un termómetro, y en demostrar que el instrumento se calienta ó se enfria casi con la misma rapidez que cuando el globo está lleno de aire. Parece resultar de este experimento que el calor no se puede trasmitir ó «comunicar á *través del vacío* sino por las vibraciones de un medio mucho más sutil que el aire.» *(Cuestiones de óptica.)* «Este medio, añade, ¿no es muchísimo más tenue y sutil que el aire, y tambien mucho más elástico y activo? ¿No penetra fácilmente todos los cuerpos, y en virtud de su fuerza elástica no se difunde por todas partes?»

Cosa rara: Newton que niega al éter en movimiento la propiedad que hoy se le atribuye universalmente de ser el propagador de las ondas luminosas, lo considera susceptible de explicar los fenómenos de la gravitacion y de la gravedad.

«Este medio, dice en la Cuestion XXI de la *Optica*, ¿no está más enrarecido en los cuerpos densos del Sol, de las estrellas, de los planetas y de los cometas, que en los espacios celestes vacíos que median entre dichos cuerpos? Y pasando de estos á espacios muy remotos, ¿no va haciéndose ese medio progresivamente más denso, y no es por esto mismo *causa de la gravitacion recíproca de esos vastos cuerpos, y de las de sus partes hácia estos cuerpos mismos*, haciendo cada uno de ellos un esfuerzo para ir de las partes más densas del medio á las más enrarecidas?»

Esto probablemente no pasa de ser una hipótesis; basta para demostrar que Newton estaba muy léjos de considerar la atraccion como una especie de *cualidad oculta* que obrara á cualquier distancia, por cuanto asigna á los fenómenos de gravitacion una causa análoga á la que influye para impeler á los cuerpos leves sumergidos en un medio flúido más denso. «Porque si este medio está en el interior del cuerpo del Sol más enrarecido que en su superficie, y más áun en esta que á $^1/_{100}$ de pulgada de su cuerpo, y todavía más aquí que á $^1/_{50}$ de pulgada de su cuerpo, y más enrarecido á este $^1/_{50}$ de pulgada que en el orbe de Saturno, no veo la razon de que se detenga en ningun punto el aumento de densidad, y de que no continúe á cualquier distancia, desde el Sol hasta Saturno y áun más allá. Y aunque este aumento de densidad pueda ser sumamente lento á grandes distancias, con todo, si la fuerza elástica de este medio es extraordinariamente grande, puede bastar para impeler á los cuerpos desde las partes más densas de este medio

hácia las más enrarecidas, con toda esa pujanza á la que damos el nombre de *gravedad.*»

Por último, en una carta escrita á Bentley, Newton protesta de un modo nada equívoco contra la idea de que la causa de la gravedad pudiera ejercerse á cualquier distancia, al través del vacío absoluto, como pudiera creerse en vista del enunciado de la ley de la atraccion universal: «Que la gravedad sea innata, inherente y esencial á la materia, de suerte que un cuerpo pueda influir sobre otro á cualquier distancia, al través del vacío, y sin que otro cuerpo intermedio trasmita esta accion ó esta fuerza de uno á otro, es en mi concepto un absurdo tan grande que me parece imposible que pueda incurrir en él ningun hombre capaz de tratar cuestiones filosóficas. La gravedad debe dimanar de una causa que obre constantemente con arreglo á ciertas leyes; en cuanto á si este agente es material ó inmaterial, lo dejo al juicio de mis lectores.»

II

HIPÓTESIS CONTEMPORÁNEAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA ATRACCION

Faraday, uno de los físicos más eminentes de nuestra época, ha emprendido bajo un nuevo punto de vista la crítica de la idea de que la gravitacion pueda ser una fuerza que se ejerce á cualquier distancia y sin mediacion alguna. En su concepto, existe contradiccion entre la idea de una variacion de esta fuerza por el simple hecho de los cambios de distancia, y el principio de la conservacion de la fuerza, hoy universalmente reconocido. Si dos partículas se atraen con menor energía cuando ha aumentado su distancia, ¿no prueba esto que ha debido de haber en alguna parte, dentro ó fuera, el efecto de otra fuerza equivalente á la disminucion de la atraccion? Y recíprocamente, si á consecuencia de una disminucion de la distancia de las dos masas, la fuerza de atraccion ha aumentado entre ellas, ¿no es evidente que este aumento ha debido ocurrir á expensas de alguna otra forma de fuerza? Pero no podemos apreciar el modo de manifestarse estas fuerzas supuestas, y la cuestion se reduce á saber si la teoría y la observacion llegarán á averiguar la realidad de su existencia.

Algunos sabios contemporáneos han hecho varias tentativas para plantear una nueva teoría de la gravedad. Los más notables han acogido la idea emitida por Newton en su *Optica;* sus autores atribuyen los fenómenos de gravedad y de atraccion á los movimientos del éter.

El ilustre Lamé les abrió además el camino para esta suposicion en sus *Lecciones sobre la elasticidad.*

«La existencia del flúido etéreo demostrada incontestablemente por la propagacion de la luz por los espacios planetarios; y por la explicacion tan sencilla como completa de los fenómenos de la difraccion en la teoría de las ondas; y, segun hemos visto, las leyes de la doble refraccion, prueban con no menor certidumbre que el éter existe en todos los medios diáfanos. Así pues, la materia ponderable no es única en el universo; sus partículas flotan en cierto modo en medio de un flúido. Si este flúido no es la causa única de todos los hechos observables, debe cuando ménos modificarlos, propagarlos, complicar sus leyes. No es posible por lo tanto llegar á una explicacion racional y completa de la naturaleza física, sin hacer intervenir este agente, cuya presencia es inevitable. No es posible dudar de que estudiando con acierto esta intervencion, se dará con el secreto ó con la causa verdadera de los efectos que se atribuyen al calórico, á la electricidad, al magnetismo, á la *atraccion universal,* á la cohesion, á las afinidades químicas; porque todos esos séres misteriosos é incomprensibles no son en el fondo sino hipótesis de coordinacion, útiles sin duda para nuestra ignorancia actual, pero que los progresos de la verdadera ciencia acabarán por destronar.»

¿Qué relacion puede haber entre los fenómenos de atraccion y las propiedades del medio etéreo, cuya existencia es necesaria para explicar los fenómenos de la luz? En el libro dedicado á la *Luz* veremos que estos fenómenos reconocen por causa las ondulaciones suscitadas en el éter por las vibraciones de los focos luminosos; que estas ondulaciones se propagan con una velocidad de 300,000 kilómetros por segundo y tienen efecto en un sentido perpendicular á la direccion de los rayos de luz, sin que la densidad del medio varíe. Pero los geómetras han demostrado que toda conmocion excitada en

un medio elástico homogéneo engendra dos sistemas de ondas que se propagan esféricamente: unas son las vibraciones trasversales que constituyen la luz; otras son vibraciones longitudinales que producen condensaciones y dilataciones alternativas.

Dos físicos, MM. F. y E. Keller han recurrido á estas ondas longitudinales, cuyos efectos no los ha comprobado hasta ahora la observacion de ningun fenómeno conocido, para hallar la explicacion de los fenómenos de gravitacion ó de gravedad. Dichos físicos comparan la accion de las ondas longitudinales con la de las ondas líquidas que arrastran á los buques por el exceso de la fuerza viva de su flujo sobre la de su reflujo; de sus impulsos y de sus reacciones resulta un exceso de fuerza en el sentido de la propagacion de las ondas que, comunicándose á las moléculas de los cuerpos resistentes, los empujan unos hácia otros. Las ondas se cruzan en todas direcciones en el seno del éter, y dos moléculas ó dos cuerpos que á alguna distancia reciban los choques de unas y otras, actuan mutuamente como pantallas que absorben los impulsos, resultando de aquí para dichos cuerpos una tendencia á acercarse, que seria la gravitacion. Los señores Keller opinan que de esta hipótesis podria deducirse la ley de la atraccion inversa del cuadrado de las distancias y proporcional á las masas, es decir, al número de moléculas.

Más adelante ha propuesto M. Leray una hipótesis análoga, y M. Lecoq de Boisbaudran la ha propuesto tambien, aunque bajo forma algo distinta. El primero atribuye la gravitacion á la accion de las corrientes de encontradas direcciones que atraviesan el éter y que se debilitan al encontrar un cuerpo ó quedan absorbidas en él. El segundo, como los señores Keller, parte del principio de las vibraciones del éter.

Para unos y otros, la fuerza viva absorbida es la causa de las vibraciones interiores que producen el calor y la luz.

Nos limitaremos á este incompleto resúmen de hipótesis que nos han parecido interesantes, pero que, no habiendo salido áun del terreno de las conjeturas, no han podido contar todavía con la adhesion de los hombres de ciencia. Recordaremos que Lamé, prediciendo con la autoridad de su alta competencia el papel que habria de desempeñar en las teorías científicas el flúido etéreo, «segunda especie de materia, decia, infinitamente más extendida,» hacia sus reservas sobre la legitimidad de las tentativas que no dejarian de practicarse en este concepto. «Hace mucho tiempo que he llegado á deducir dos conclusiones nuevas: primera, que la ciencia futura reconocerá en el *éter* el verdadero *rey* de la naturaleza física; segunda, que si se le quisiera coronar desde luégo, se retardaria infinitamente su sólida instalacion.»

SEGUNDA PARTE

APLICACIONES DE LA GRAVEDAD Á LAS CIENCIAS, Á LA INDUSTRIA Y Á LAS ARTES

No hay trabajo humano de cuantos tienen la materia por objeto en el que no entre el peso de los cuerpos como elemento, ya se presenten estos en estado sólido, en el líquido ó en el de vapor ó gas, siendo por tanto preciso tener en cuenta los efectos de la gravedad y calcularlos, cosa tan indispensable respecto del movimiento como respecto del equilibrio. Así pues, podríamos considerar justamente las construcciones fijas, como monumentos, edificios públicos ó privados, casas, puentes, acueductos; las construcciones movibles de las vías de trasporte terrestres, fluviales y marítimas; las máquinas, aparatos, artefactos y herramientas de todas clases, podríamos considerar todo esto, repetimos, desde el punto de vista del equilibrio ó de la estabilidad y del movimiento, como otras tantas aplicaciones de la física y sobre todo como aplicaciones de los fenómenos y de las leyes de la gravedad.

Pero fácilmente se comprenderá que tan vasto plan no es en modo alguno el que nos hemos trazado. El sentido que nos proponemos dar aquí á las aplicaciones de los fenómenos y de las leyes de la gravedad es mucho más restringido: y solamente nos ocuparemos de aquellas cuyo principio mismo está sacado de las leyes de los fenómenos en cuestion, haciendo caso omiso de las numerosas aplicaciones que dependen exclusivamente de la Mecánica. Esta observacion es aplicable á todas las categorías de la física; pero refiriéndonos únicamente á la gravedad, objeto particular de esta segunda parte de nuestra obra, nos concretaremos á describir las aplicaciones, instrumentos ó máquinas basados en algunos de los fenómenos ó leyes de la gravedad, como por ejemplo, en la constancia de la direccion de esta fuerza en la superficie de la Tierra, en la fuerza viva desarrollada por un cuerpo que cae desde cierta altura, en el isocronismo de las oscilaciones del péndulo, en la presion de la atmósfera, etc. Y áun así y todo, habremos de ceñirnos á tratar de aquellas aplicaciones que tienen mayor importancia práctica, y cuya utilidad social es más positiva, ó tambien de aquellas que despiertan cierto interés de curiosidad y ponen mejor en evidencia las verdades científicas. Varias de estas aplicaciones se conocen desde la más remota antigüedad: otras son de invencion moderna. Enumeraremos rápidamente las más importantes.

Si el peso de los cuerpos es á menudo, en cuanto al trabajo, un obstáculo que se requiere vencer, tambien nos sirve de útil auxiliar, del cual hacen un uso continuo y necesario las máquinas de toda clase; mas, con respecto á este punto, volvemos á colocarnos en el terreno de la mecánica aplicada más bien que en el de la física, por lo cual sólo trataremos de las aplicaciones más sorprendentes de esta clase, de aquellas en que la fuerza viva de los cuerpos que caen por efecto de la gravedad, más bien que el peso muerto, es la que sirve para producir el efecto apetecido. En otros casos lo que da orígen á efectos que podrian calificarse de prodigiosos, es el juego ó combinacion de acciones relativamente mínimas, gracias á las propiedades de los flúidos: la *prensa hidráulica*, ese invento de Pascal, que no pudo realizarse hasta un siglo despues de su muerte, nos presenta la fuerza muscular de un hombre centuplicada por la poderosa máquina que aplasta y

tritura las materias más resistentes y levanta á grandes alturas pesos enormes: movida por el vapor, coloca á treinta ó cuarenta metros de elevacion el gigantesco tubo de hierro laminado por el cual cruzan un brazo de mar las locomotoras y cuyo peso no baja de dos millones de kilógramos.

¿Qué nueva invencion ha permitido emprender y llevar á cabo la grandiosa obra de la perforacion subterránea de los Alpes, bajo el desfiladero de Frejus, obra que se ha repetido con éxito en el San Gotardo y de la cual se estudia hoy una nueva aplicacion en el monte Blanco ó en el Simplon? El uso del aire comprimido por un salto de agua que cae en unos recipientes, de los cuales es impelido á las profundidades del túnel en construccion. La fuerza de la gravedad, trasformada de tal suerte, pone en movimiento los floretes que atacan y deshacen la roca, y luégo, cuando la pólvora ha terminado la obra, el aire nuevo reemplaza á la atmósfera viciada y ahumada de la comenzada galería. Allí donde se hubieran frustrado los esfuerzos del vapor, triunfa la compresion mecánica del aire, obtenida por un golpe de agua, es decir, la gravedad.

Tambien es el aire comprimido el que hace posibles la construccion y fundacion rápidas de los estribos de los puentes tendidos sobre los brazos de mar ó los rios; el que en ciertas líneas subterráneas de ferro-carril lanza los trenes de un extremo á otro de un túnel como la bala disparada con una cerbatana; el que trasmite los despachos de una estacion telegráfica á la estacion central, innovacion que se acaba de adaptar con feliz éxito á la distribucion de la hora. El vacío hecho con una poderosa máquina neumática en una de las caras de un émbolo movible en un tubo, deja al aire situado en la otra cara la fuerza expansiva necesaria para arrastrar grandes pesos; este procedimiento, contrario al de la aplicacion del aire comprimido, se ha adoptado tambien en el servicio de los despachos telegráficos ó postales, y en Francia se le ha visto servir de motor para el tren que subia la cuesta del Pecq á San German, cerca de Paris.

Un principio físico relacionado con la gravedad y cuyo descubrimiento se remonta á una apartada antigüedad,—pues lleva el nombre del grande hombre que lo ha descubierto, de Arquímedes,—se aplicó á fines del siglo pasado á la ascension de los globos á las alturas de la atmósfera. El arte del aeronauta, perfeccionado sobremanera, se ha popularizado hoy, y los globos surcan ya todos los años las regiones aéreas, dándonos á conocer muchas de sus curiosas particularidades, siendo de esperar que, puestos en manos de observadores inteligentes, acaben por revelarnos todos los misterios de la atmósfera. La meteorología, tan poco adelantada aún, no puede dejar de sacar partido de ellos. Por otra parte, durante la guerra francc-prusiana se han enviado globos, á modo de mensajeros, desde el seno de Paris á todos los puntos de Francia, llevando en sus frágiles barquillas noticias de la poblacion sitiada á los ausentes. Tal vez llegue un dia en que se resolverá parcialmente el problema de la direccion de esos barcos aéreos, ya con su forma actual ó ya con otra nueva, en que podrán aguantar el viento ó hender el aire como los buques de vapor hienden el mar: entónces, en lugar de experimentos curiosos ó exclusivamente científicos, como los que se pueden hacer con los globos actuales, presenciaremos verdaderos viajes aéreos, expediciones regulares capaces de suministrar explicaciones útiles.

Por lo demás, no debe olvidarse que las aplicaciones científicas á la industria y á las artes y las invenciones que tienen por objeto la ciencia misma, se confunden á menudo en la historia: el descubrimiento de tal ó cual ley física ha sido la consecuencia de una investigacion puramente empírica, que al principio tuvo por único objeto el perfeccionamiento de un oficio, de un procedimiento industrial; en cambio, tal invento, de gran importancia industrial, ha sido deducido poco á poco de la demostracion experimental ó práctica de una verdad del órden más abstracto: doble circunstancia en la cual nos parece oportuno insistir, porque tiene á nuestros ojos verdadera importancia filosófica. Parécenos, en efecto, á propósito para que nuestros lectores se pongan en guardia contra dos tendencias opuestas, igualmente enojosas; una propia de las personas que, enfatuadas con su saber técnico ó con su habilidad práctica, desdeñan la teoría y la ciencia pura; otra, más peculiar de ciertos sabios que se creen profun-

dos filósofos, los induce á menospreciar los conocimientos adquiridos por los prácticos en su industria ó profesion, conocimientos que á menudo son reales y positivos, aunque no razonados, y á los que no se debe confundir con la rutina.

Hechas de una vez para siempre estas observaciones preliminares, entremos en materia.



Fig. 147. — Huygens

CAPÍTULO PRIMERO

DIRECCION DE LA GRAVEDAD—CAIDA DE LOS CUERPOS—OSCILACIONES DEL PÉNDULO

I

PLOMADA

En las artes, y sobre todo en las de la construccion, se necesita á cada momento trazar líneas ó planos en direccion de la vertical ó en una direccion horizontal, es decir, perpendicular á la primera; ó si dichas líneas y planos están trazados, es preciso cerciorarse de su verticalidad ó de su horizontalidad rigurosas.

Hácese esto con unos instrumentos llamados *plomada* y *nivel*, basados ambos en el hecho de que un hilo estirado por un cuerpo pesado toma cuando está en reposo la direccion precisa de la vertical del lugar en que se encuentra.

Todo el mundo conoce la plomada de que hacen uso los albañiles, y que consiste en un cordel del que pende una pesa cilíndrica de metal.

Una placa cuadrada, tambien de metal y de las dimensiones del diámetro del cilindro, corre por el cordel merced á un agujero que aquella tiene en su centro, y se aplica contra la pared cuya verticalidad se desea reconocer. Cuando el cilindro queda en reposo debe rasar con la superficie de la pared, sin apoyarse en

ella ni dejar entre ésta y él intervalo alguno perceptible.

Para el propio objeto sirve una regla de bordes ó cantos laterales perfectamente paralelos en medio de la cual está trazada una recta, llamada *línea de fe*. Aplícase uno de los cantos contra la línea ó plano que se ha de reconocer, y es preciso que el hilo sujeto en el extremo de dicha recta y teso por una masa pesada

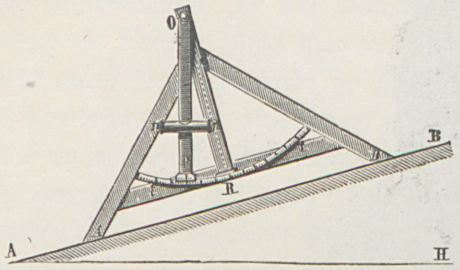


Fig. 148.—Nivel de perpendículo de Delambre para las operaciones de geodesia

coincida en su posicion de equilibrio con la *línea de fe* de la regla. Para que la prueba sea completa, se da vuelta á la regla y se hace la misma comprobacion por el canto contrario.

Otra clase de niveles usan los albañiles, los llamados *triángulos niveladores*, tan conocidos de todo el mundo que juzgamos ocioso describirlos.

En geodesia se emplea el *nivel de perpendículo* (nombre que se da al instrumento representado en la fig. 148) convenientemente perfeccionado para medir el ángulo de inclinacion de una recta. En él está sustituida la plomada por una regla suspendida en el punto O y cuya extremidad inferior lleva un vernier. Merced á un limbo graduado se conoce el valor del ángulo POR formado por la regla y por la línea de fe. Se puede pues averiguar la inclinacion de la recta AB sobre el horizonte AH, por cuanto POR es igual al ángulo BAH, puesto que los lados de dichos ángulos son perpendiculares entre sí dos á dos.

Delambre se sirvió del nivel de perpendículo así perfeccionado en las operaciones que dirigió para medir el meridiano, con el objeto de valuar las inclinaciones al horizonte de las reglas empleadas para medir sus bases.

Más adelante hablaremos del *nivel de agua* y del de *aire*, fundados, el uno en el equilibrio de un líquido en vasos comunicantes, y el otro en el de los flúidos de desigual densidad.

II

MOTONES Y CÁBRIAS

Sabemos que una masa pesada que cae desde cierta altura se mueve con una velocidad creciente, cuyo cuadrado es proporcional á la altura del punto de partida. El trabajo ó efecto mecánico así desarrollado por la accion de la gravedad, y que se conoce multiplicando la masa por el cuadrado de la velocidad ó por la altura, se utiliza para hincar las estacas ó postes que sirven de cimientos á las pilas de puentes y á otras grandes obras hidráulicas. Dase el nombre de cábrias á las máquinas que sirven para elevar, guiar y dejar caer sobre los postes grandes masas de madera ó hierro, las cuales llevan á su vez el de motones.

La *cábria de gripia de palanca* y la *cábria de mordaza* están representadas en la fig. 153. Difieren una de otra en que, en la primera la maniobra de los motones, ya sea para elevar su masa ó bien para dejarla caer y que corra entre las dos piezas llamadas *gemelos*, la efectúan va-

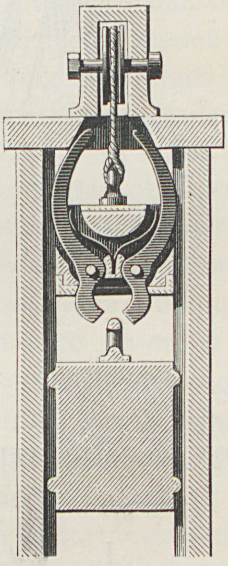


Fig. 149.—Detalle del mecanismo de los motones de mordaza

rios obreros que tiran individualmente de otras tantas cuerdas.

En la segunda bastan uno ó dos obreros para manejar una cábria de engranajes que levanta el moton á la altura deseada. Al llegar á este punto, la masa que estaba retenida durante su elevacion por los dos brazos de una mordaza, queda libre y vuelve á caer sobre la cabeza del poste.

Fácilmente se comprenderá el mecanismo

merced al cuál queda en libertad el moton, echando una ojeada sobre la figura 149, que da el detalle de la mordaza. Dos fuertes pinzas metidas en la anilla que remata el moton por su parte superior, están sujetas por un muelle durante la subida del peso; pero cuando éste llega al fin de su carrera ascendente, los brazos superiores de las pinzas penetran en una abertura que se va estrechando á modo de cono; se juntan progresivamente, y en virtud de un movimiento contrario los dos brazos inferiores se abren, se separan del anillo y sueltan el moton.

Por lo comun se da principio al trabajo con la cábria de palanca, que tiene en su ventaja su mayor sencillez y la rapidez en su manejo, pero con la que no se puede elevar el moton sino á escasa altura, esto es, á 1 metro ó $1^{m}20$. Cuando las estacas, introducidas ya á cierta profundidad, ceden difícilmente á los golpes del moton, entónces se hace uso de la cábria de mordaza para concluir el trabajo, pudiéndose elevar la masa con ellas á una altura que varía entre $2^{m},5$ y 5 ó 6 metros; por consiguiente, es mucho más considerable el efecto útil, que depende de la altura de la caida.

El peso del moton varía entre 300 y 600 kilógramos, y el número de hombres necesarios para manejar las cábrias de mordaza, asciende á unos 40. Hace poco tiempo se ha aplicado el vapor á estos aparatos; como se ve en la fig. 153, es una locomóvil la que en tal caso pone en movimiento el mecanismo de la cábria.

El *martinete*, especie de moton empleado en los trabajos de las fundiciones de hierro, es una aplicacion de la gravedad análoga á las cábrias. Aquí nos limitaremos á mencionarlo, proponiéndonos describirlo en los capítulos consagrados al vapor, pues ahora solo debemos tener en cuenta la aplicacion importante de la fuerza viva desarrollada por una masa pesada en su caida, por la sola accion de la gravedad.

Observemos para terminar que no se utiliza toda esta fuerza en el choque para producir el efecto apetecido, que es el hundimiento de los postes ó estacas, sino que una parte se transforma en calor, es decir, en un movimiento molecular íntimo de las dos masas que chocan una con otra, el moton por una parte y por otra la cabeza del poste y el aro ó fleje de hierro que la refuerza para que resista el esfuerzo ó empuje lateral, capaz de hacer astillas, á no ser por él, la estaca ó poste en cuestion.

III

EL PÉNDULO REGULADOR DE LOS RELOJES Ó SIMPLEMENTE PÉNDOLA

Despues que Galileo hubo descubierto la propiedad que tienen las oscilaciones del péndulo de ser marcadamente isócronas cuando su amplitud es muy pequeña, pensó en utilizar tan preciosa propiedad para medir con exactitud el número de pulsaciones arteriales; y segun se asegura, inventó el instrumento, á que dió el nombre de *pulsílogo*, y que es simplemente un péndulo.

Pero lo que parece indudable es que Huygens fué el primer inventor de la aplicacion del isocronismo del péndulo á la relojería (1656). Tres siglos y medio hacia próximamente que se habia extendido el uso de los relojes de ruedas dentadas; pero eran todavía unas máquinas muy imperfectas, por falta de un regulador constante del movimiento de sus órganos. Hé aquí cómo Huygens resolvió el problema.

Sábese que el motor de los aparatos de relojería es unas veces una pesa que al bajar por efecto de la gravedad, desenrolla la cuerda de la cual está suspendida, haciendo de este modo dar contínuas vueltas al eje de una rueda dentada; otras veces es un muelle de acero que se distiende poco á poco y cuya accion regulariza un mecanismo especial casi de un modo uniforme; al distenderse dicho muelle pone tambien en contínuo movimiento la rueda dentada que lo trasmite á las demás ruedas del instrumento.

Tanto en un caso como en otro, la principal dificultad estribaba en establecer un movimiento perfectamente regular y uniforme, á pesar de todas las causas de alteracion y de las resistencias variables opuestas por el juego de un número bastante considerable de piezas.

Se ha allanado esta dificultad de diversos modos, trasformando el movimiento continuo comunicado á las ruedas por el motor en un movimiento oscilatorio ó periódico, por medio del regulador. El regulador de relojes más sencillo á la vez que el más exacto es el péndulo. Veamos cómo ideó y realizó Huygens su aplicacion.

R es una rueda dentada, de dientes oblicuos (fig. 150), á la cual la pesa motora M del reloj comunica el movimiento, que dicha rueda trasmite en seguida al sistema de piñones y de ruedas dentadas que constituyen el mecanismo particular del aparato. Para mayor secillez hemos suprimido en el grabado las ruedas intermedias.

PP' es el péndulo ó regulador del movimiento. Las oscilaciones se trasmiten por medio de la horquilla ó pieza movible *f* y del árbol ED á la pieza ABC, que por su forma ha recibido el nombre de *áncora*. ABC oscila pues de igual modo que el péndulo mismo, y como sus dos extremos AC se encorvan de suerte que se introducen entre los dientes de la rueda R,

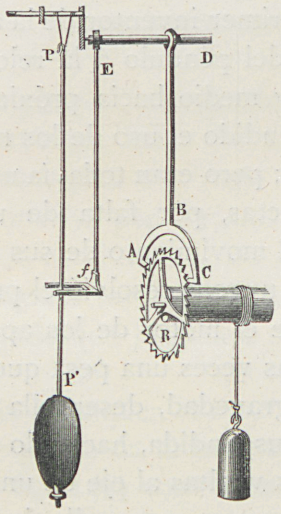


Fig. 150. — Mecanismo del péndulo regulador

miéntras uno de estos dientes se apoya en la cara superior de uno de los extremos del áncora, el movimiento de la rueda queda suspendido. A cada oscilacion del áncora, se desprende un diente de la rueda detenida de tal suerte, y el movimiento sigue su curso, de modo que este movimiento, que seria continuo si se debiera solamente á la accion de la pesa motora, se vuelve periódico, siendo la duracion de cada período la de una oscilacion del péndulo. Como estas oscilaciones son isócronas, lo es tambien el movimiento de la rueda dentada y el de todas las demás del mecanismo. Pero la disposicion de las piezas A y C (figs. 151 y 152) es tal que á cada período, el diente de la rueda que se afianza en una de ellas para escapar, comunica parte de su movimiento al áncora y luego al péndulo, cuyas amplitudes son por lo tanto constantes y cuyas oscilaciones no cesan sino cuando el motor, pesa ó muelle, cesa de actuar.

La duracion de estas oscilaciones depende,

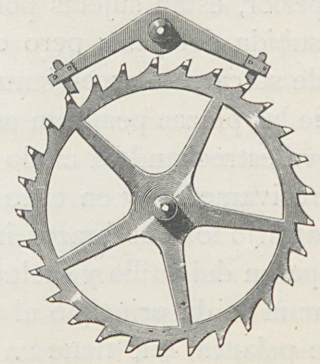


Fig. 151. — Escape de áncora

como ya sabemos, de su longitud, y esta longitud se determina en cada reloj con arreglo á la conexion que existe entre el minutero y la *rueda de encuentro*, llamada tambien *rueda de escape*.

Vése por lo que precede que la funcion del péndulo consiste en regularizar el movimiento del motor de los relojes, repartiendo este mo-

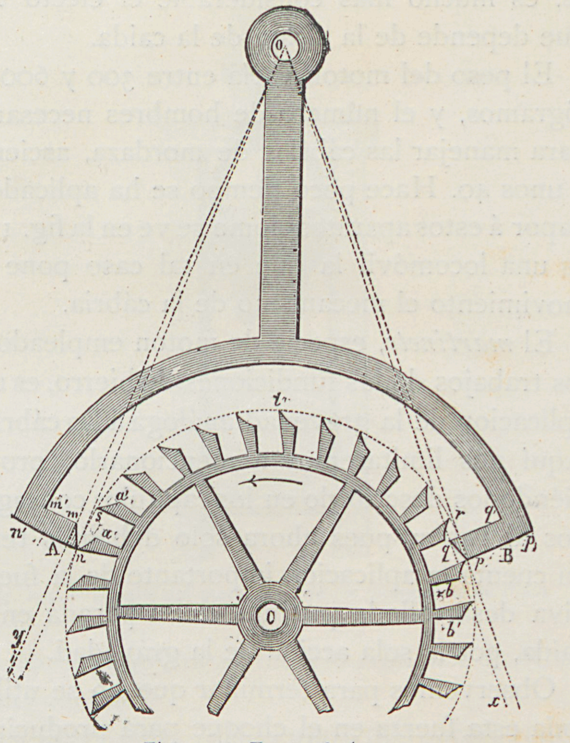


Fig. 152. — Escape de áncora

vimiento continuo en una serie de otros oscilatorios separados por intervalos de reposo de corta duracion, tambien espaciados por igual, de suerte que el período tiene una duracion constante como la de las oscilaciones isócronas del péndulo.

Hemos dicho anteriormente que el ilustre Huygens fué quien ideó el aplicar el péndulo como regulador de los relojes. En 1657 presentó á los Estados de Holanda un reloj regulado por el péndulo, y al año siguiente publicó una obra sobre tan importante aplicacion. Pero hasta diez y seis años despues, es decir, en 1673, no apareció el admirable tratado *De horologio oscillatorio ex Christiano Huygenio*, en el que se demuestran las propiedades de isocronismo de las pequeñas oscilaciones pendulares, y las del péndulo cicloidal, acerca del cual diremos algunas palabras.

Segun ántes hemos visto, la pesa motora del reloj es la que, por medio de la rueda de escape, comunica un leve impulso al péndulo á cada

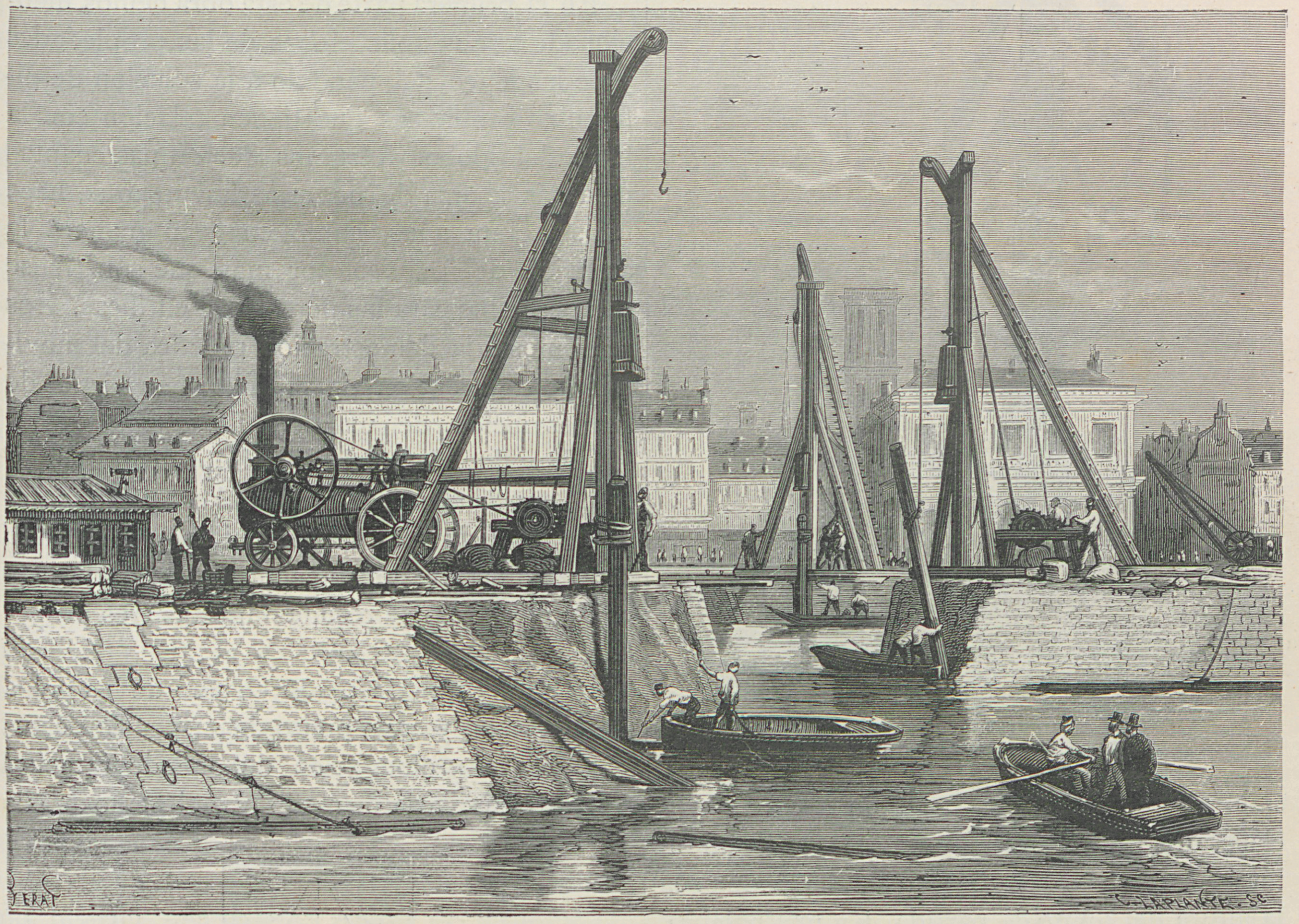


Fig. 153. — Cabrias y motones

oscilacion, y le mantiene así en movimiento; á no ser por esto, las oscilaciones disminuirian poco á poco de amplitud y el péndulo acabaria por pararse. Pero todavía hay otras causas de desigualdad, porque los impulsos del motor pueden variar por diferentes motivos; de lo cual resulta que las amplitudes de dichas oscilaciones pueden disminuir, y por lo tanto ser menor su duracion, aun cuando no variase la longitud del péndulo, siguiéndose de aquí que el reloj adelantaria.

Huygens buscó y halló el medio de subsanar esta dificultad merced á un admirable descubrimiento que, por desgracia, no se ha podido adoptar, á causa de las dificultades que en su aplicacion presenta. Nos referimos á la invencion del péndulo cicloidal, así llamado porque está basado en una propiedad de la curva geométrica llamada *cicloide*.

Consiste en un péndulo (fig. 154) cuya varilla es una hoja metálica flexible suspendida entre dos piezas sólidas que tienen la forma de dos arcos de cicloide tangentes en su punto de orígen. Al oscilar, la hoja metálica se enrolla en cada uno de estos arcos, y la longitud del péndulo queda así disminuida en una proporcion que depende de la amplitud de las oscilaciones. Huygens averiguó que si el círculo

generador de los arcos de cicloide tiene precisamente por diámetro la mitad de longitud de oscilacion del péndulo (fig. 155), el centro de este describe un arco P''PP' que es á su vez un arcó de cicloide. Ahora bien, un cuerpo pe-

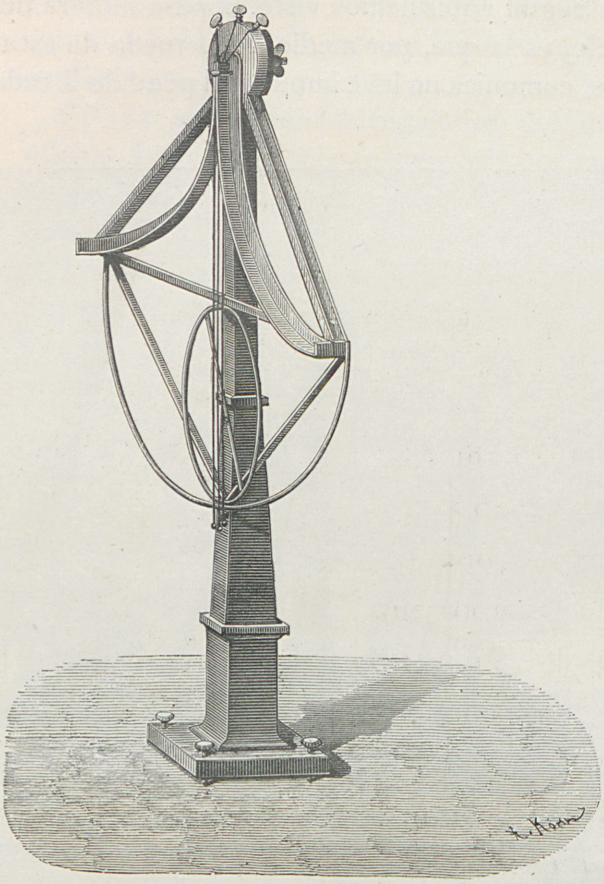


Fig. 154.—Péndulo cicloidal de Huygens

sado que al descender traza un arco de esta clase, invierte el mismo tiempo en llegar al término de su carrera en P, cualquiera que sea la altura del punto de partida. En una palabra, las oscilaciones del péndulo son siempre isócronas, y este isocronismo independiente de la amplitud.

El isocronismo de las oscilaciones pendulares supone, además de la pequeñez de los arcos descritos, la invariabilidad de la longitud del péndulo mismo. De aquí nace otra dificultad que procede de que la longitud del péndulo varía en realidad con la temperatura, aumentando cuando ésta aumenta, y acortándose cuando disminuye. En los capítulos dedicados al Calor, veremos cómo se consigue vencer esta nueva dificultad. Terminaremos este artículo haciendo resaltar la inmensa importancia del descubrimiento y de la invencion de Huygens, invencion que ha sido á su vez consecuencia de las observaciones de Galileo. Desde aquella época, ha llegado á ser la relojería un arte de precision que ha prestado señalados servicios á todas las ciencias físicas y en especial á la astronomía.

IV

MOVIMIENTO DE ROTACION DE LA TIERRA Y DESVIACION APARENTE DEL PÉNDULO

En la primera parte de esta obra hemos mencionado varias aplicaciones de las propiedades y de las leyes del péndulo á la solucion de diferentes problemas que tienen relacion con la física del globo. Réstanos decir unas cuantas palabras acerca de un experimento que, hace unos treinta años, llamó en gran manera la atencion del público, por más que sólo fuese comprensible para las personas científicas. Nos referimos á la demostracion práctica del movimiento de rotacion de la Tierra en virtud de la desviacion de un péndulo, demostracion ideada y llevada á cabo por Leon Foucault.

El experimento de que hablamos está basado en un principio de mecánica que, aplicado al movimiento de rotacion de un esferoide como la Tierra, se resume en estas tres proposiciones:

1.ª Un péndulo situado en uno de los polos de la Tierra, y cuyo punto de suspension estuviese en la prolongacion del eje de rotacion terrestre, oscilaria de modo que el plano de sus

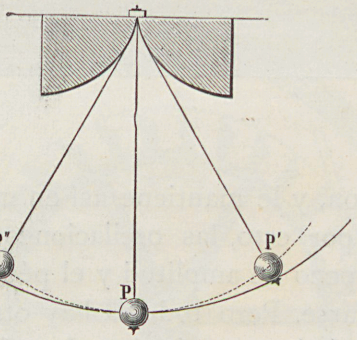


Fig. 155.—Movimiento del péndulo cicloidal

oscilaciones sucesivas conservaria realmente en el espacio una direccion invariable. Así pues, un observador colocado en dicho polo, viéndose llevado por la rotacion de la Tierra sin tener conciencia de su propio movimiento, creeria notar que el péndulo oscilaba en planos variables que coincidirian sucesivamente con todos los meridianos; trascurrido un dia sidéreo,

es decir, despues de veintitres horas y cincuenta y seis minutos de tiempo medio, le pareceria que el plano de oscilacion del péndulo habia efectuado una revolucion completa alrededor de la vertical, y en un sentido precisamente contrario al de la rotacion real.

2.ª En el ecuador sucederia lo contrario; el movimiento de rotacion del globo no ejerceria influencia alguna en la direccion aparente del plano de las oscilaciones, que pareceria y estaria en efecto inmóvil con relacion al horizonte.

3.ª Por último, la teoría demuestra que á una latitud diferente de 90° ó de 0°, la desviacion aparente del plano de las oscilaciones del péndulo se efectuaria en la misma direccion que en el polo más próximo; sólo que esta desviacion seria tanto más lenta cuanto más próximo al ecuador estuviese el lugar del experimento. El cálculo demuestra que en Paris (latitud 48° 50′) el péndulo invertiria unas treinta y dos horas en dar la vuelta entera al horizonte, haciendo por supuesto abstraccion de retrasos ocasionados por el roce en el punto de suspension y por la resistencia del aire.

Pues bien: Leon Foucault comprobó este resultado en Paris, en 1851, bajo la cúpula del Panteon. El sabio físico preparó su experimento, que atrajo gran número de curiosos, del modo siguiente. En una placa metálica puesta en el punto culminante del interior de la cúpula encajó sólidamente un alambre de acero de 64 metros de longitud, de cuyo extremo inferior pendia una esfera de laton muy pesada (fig. 156). Desviado de su posicion natural y abandonado á sí mismo, este péndulo ejecutaba con gran lentitud una serie de oscilaciones en un plano cuya invariabilidad la demuestra la teoría, segun hemos dicho ántes. En la hipótesis de la inmovilidad de la Tierra, la orientacion primitiva de este plano deberia de haber sido constante. Pues bien, los numerosos testigos de este curioso experimento pudieron notar la desviacion aparente de Oriente á Occidente del plano vertical en el cual oscilaba el péndulo. En una hora, el arco que marcaba esta desviacion era, á muy corta diferencia, el que indicaba la teoría, esto es, 11° 17′. Un punzon metálico fijo en la parte inferior de la bola del péndulo rasaba poco á poco en sentido contrario con dos montoncitos de arena puestos en una galería circular y en los extremos de un mismo diámetro; de suerte que la desviacion aparente del plano de las oscilaciones, dimanada del movimiento de rotacion de nuestro globo, y por consiguiente esta relacion misma, eran visibles á los ojos de todos los presentes (1).

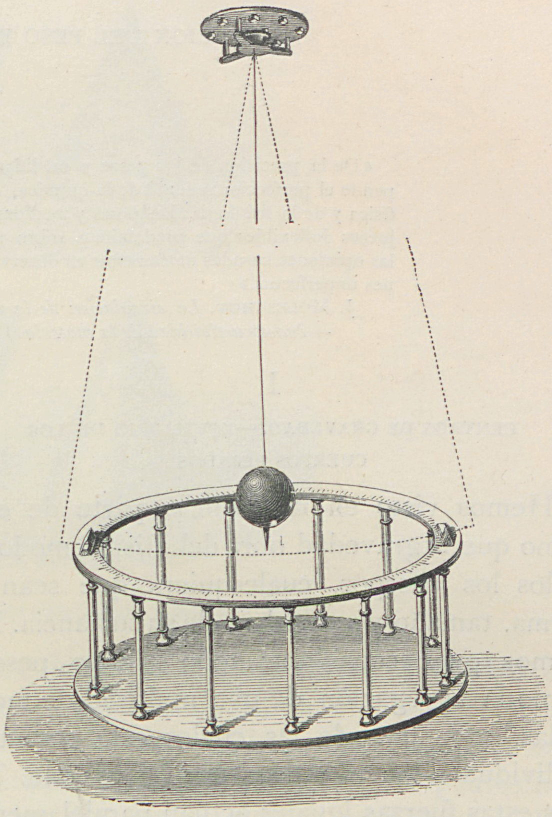


Fig. 156.—Péndulo de Leon Foucault

Hoy se reproduce el experimento de Leon Foucault haciendo uso de péndulos de dimension mucho menor. Una condicion esencialísima de esta reduccion de longitud consiste en el modo de suspension, la cual debe permitir al péndulo oscilar libremente en todos los azimuts, requisito que llena enteramente la suspension *á la Cardan*. Verifícase de un modo muy ingenioso la anotacion gráfica de las desviaciones; la bola del péndulo lleva en su parte inferior un punzon fino y flexible cuya punta rasa con la superficie de una cinta de papel ennegrecida con negro de humo, pegada á la superficie de

(1) Leon Foucault ha hecho evidente de otro modo el principio de rotacion de la Tierra, basándose en un principio análogo de mecánica. El aparato á que aludimos ha recibido el nombre de *giroscopio*. El lector encontrará su descripcion y teoría en los tratados de mecánica más recientes. *(N. del A.)*—Tambien está descrito dicho aparato en la obra titulada *El Telescopio moderno*, publicada por nuestra casa editorial. *(N. de los E.)*

un arco de círculo, cuyo radio es precisamente la longitud comprendida entre el punto de suspension y la extremidad del punzon flexible. La direccion del plano del péndulo resulta marcada, á cada una de sus oscilaciones, con una rayita blanca, y así se conserva la huella de las desviaciones continuas y sucesivas de dicho plano.

CAPÍTULO II

MEDICION DEL PESO DE LOS CUERPOS—LA BALANZA

«De la precision de las pesas y medidas depende el perfeccionamiento de la química, de la física y de la fisiología. Las pesas y medidas son jueces inflexibles que predominan sobre todas las opiniones basadas únicamente en observaciones imperfectas.»

J. MOLESCHOT. *La circulacion de la vida.* —*Indestructibilidad de la materia.)*

I

CENTROS DE GRAVEDAD.—EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS PESADOS

Hemos visto en la primera parte de este tomo que la gravedad obra del mismo modo en todos los cuerpos, cualesquiera que sean la forma, tamaño y naturaleza de su sustancia. Podemos pues considerar todo cuerpo pesado como la agregacion de una multitud de moléculas, cada una de las cuales está sometida individualmente al influjo de la gravedad. Todas estas fuerzas iguales actúan paralelamente, de suerte que producen el mismo efecto que una fuerza única y de intensidad igual á la suma de todas ellas. Esta resultante de todas las acciones de la gravedad compone el *peso* del cuerpo. El punto á que dicha resultante se aplica y que lleva el nombre de *centro de gravedad del cuerpo*, es el que se necesita sostener para que este no pierda el equilibrio, sea cualquiera la posicion que ocupe. Dicho punto no está siempre situado en el interior del cuerpo mismo, sino que en ciertos casos se halla fuera, en un sitio independiente de la masa material.

Puede ser interesante, y á menudo muy útil conocer la posicion del centro de gravedad de un cuerpo. En el caso en que la materia de que este está compuesto sea homogénea en todas partes y su forma simétrica ó regular, la averiguacion del centro de gravedad es puramente asunto de geometría. Veamos cuáles son las más comunes de estas formas.

Una *línea recta* pesada tiene su centro de gravedad en medio de su longitud. En realidad, la línea material es prismática ó cilíndrica; pero en el caso en que el espesor sea muy pequeño, relativamente á la longitud, se puede prescindir de él sin inconveniente. La misma observacion podemos hacer con respecto á las superficies muy delgadas, á las que se considera como figuras planas ó curvas sin espesor ó grueso.

El *cuadrado*, el *rectángulo*, el *paralelógramo*, tienen sus centros de gravedad en el punto de interseccion de sus diagonales. El *triángulo* lo tiene en el punto de encuentro de las líneas que van á parar desde cada vértice á la mitad del lado opuesto, es decir, en el tercio de cualquiera de estas líneas á partir de la base. Si estas superficies estuvieran reducidas á sus contornos exteriores, la posicion de los centros de gravedad no cambiaria. El centro de figura de un *círculo* ó de un *anillo circular* ó de una *elipse*, es al mismo tiempo su centro de gravedad. En el anillo circular tenemos un ejemplo del centro de gravedad situado fuera del espacio ocupado por la materia del cuerpo.

Los cilindros *rectos* ú *oblícuos*, los *prismas regulares*, los *paralelepípedos* tienen sus centros de gravedad en la mitad de su eje (fig. 157). El de la *esfera* ó de la *elipsoide* de revolucion está en su centro de figura (fig. 158). Lo propio podemos decir de una *esfera hueca*, es decir, del centro de gravedad de un sólido comprendido entre dos esferas concéntricas. Para tener el de una *pirámide* ó un *cono*, recto ú oblícuo, es preciso reunir el vértice al centro de gravedad del polígono de base, y tomar la cuarta parte de esta línea á partir de la base.

Esto, por lo que respecta á los cuerpos de forma geométrica homogéneos y sea cualquiera

el estado físico de la materia de que están formados (1).

Pero lo más frecuente es que el cuerpo tenga una forma irregular, ó que la materia de que se compone no esté condensada por igual en todas sus partes. En este caso, la averiguacion del centro de gravedad es cuestion de práctica.

Uno de los medios más sencillos de encontrarlo consiste en suspender el cuerpo de un hilo. Cuando este se halla en equilibrio, se ve que el centro de gravedad está en la prolongacion del hilo cuya posicion es entónces vertical: se anota esta direccion, y se hace otra averiguacion suspendiendo el cuerpo por otro de sus

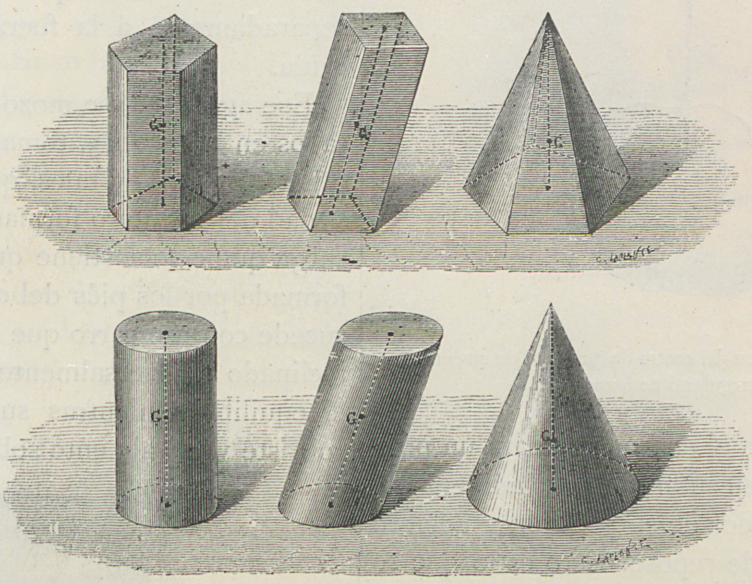


Fig. 157. —Centros de gravedad de un prisma, un cilindro, una pirámide y un cono

puntos, con lo que se tiene una nueva línea en la cual se halla el centro de gravedad. El punto de interseccion de ambas líneas señala pues el

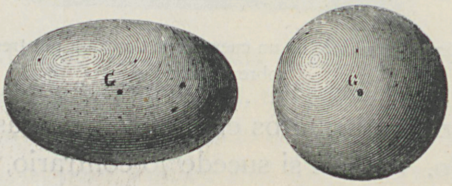


Fig. 158. —Centros de gravedad de una elipsoide de revolucion y de una esfera

del verdadero centro (fig. 160), que puede estar en el interior ó en el exterior del grave.

La definicion del centro de gravedad demuestra que cuando este punto está solamente sostenido ó bien se halla fijo, miéntras esté invariablemente unido á todos los puntos materiales de que el cuerpo se compone, hay equilibrio. Pero semejante condicion es muy difícil de llenar, por cuanto lo más frecuente es

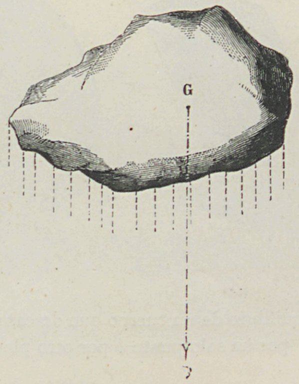


Fig. 159. —Peso de un cuerpo: centro de gravedad

que el centro de gravedad se halle en un punto interior, por el cual no se puede sostener ó suspender el cuerpo inmediatamente.

(1) Cuando los cuerpos están formados de diferentes partes geométricas reunidas de cualquier modo y teniendo cada una de ellas un centro de gravedad conocido, es fácil encontrar el de su conjunto si se conoce el peso de las partes. Tomemos un sencillo ejemplo, el del instrumento de gimnasia que se llama *halterio.* Como cada una de sus bolas es esférica, el centro de gravedad está en su centro y el del conjunto en medio de la línea que reune los dos centros. Esta parte media es tambien el centro de gravedad de la barra cilíndrica que los reune, y por consiguiente el de todo el instrumento. Pero si una de las esferas es mayor y más pesada que la otra, el centro de gravedad estará en el punto que divide la línea de los centros en partes inversamente proporcionales á los pesos de ambas esferas. El centro de gravedad de la barra cilíndrica sigue estando en su mitad. Si esta barra pesa 500 gramos, y las dos bolas, una 1 kilógramo y la otra 4, ó sea 5 kilógramos en junto, habrá que dividir la distancia desde el punto medio de la barra hasta el centro de gravedad y de las esferas en relacion inversa de las cantidades 500 y 5,000 ó sea 1 y 10, y el resultado de esta operacion indicará el centro de gravedad de todo el sistema.

Si se le suspende de un hilo ó de una cuerda flexible, el equilibrio se establecerá por sí mismo, pues el centro de gravedad irá á situarse entónces sobre la vertical que pasa por el punto de suspension. Si, despues de obtenida esta

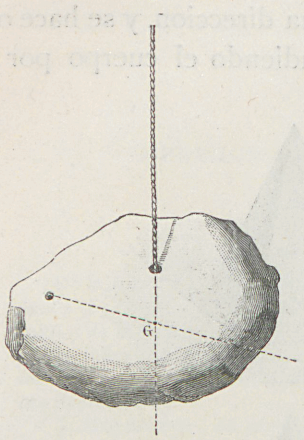


Fig. 160.—Determinacion del centro de gravedad de un cuerpo de forma irregular ó no homogénea

posicion, se empuja al cuerpo, formará un péndulo compuesto, ejecutará cierto número de oscilaciones alrededor de su posicion y volverá luégo á su estado de reposo. Esto es lo que se llama un *equilibrio estable*, equilibrio cuya condicion esencial consiste en que la posicion del centro de gravedad sea inferior al punto fijo de suspension, de suerte que si se hace mover el cuerpo dicho centro sube.

En general, para que un cuerpo pesado esté en equilibrio bajo la accion de la gravedad, se requiere y basta que su centro de gravedad se

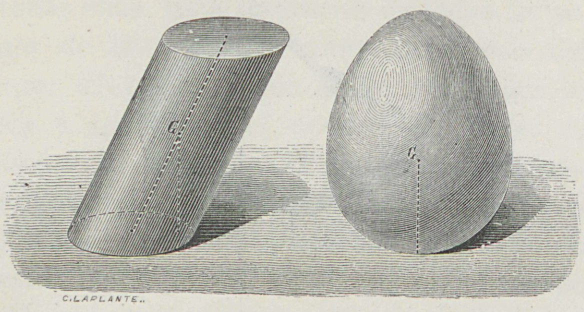


Fig. 161.—Equilibrio de un cuerpo que descansa sobre un plano por un solo punto ó por otro plano

halle en una vertical que pase por el punto de apoyo, si este punto es único, ó por el interior del plano de apoyo, ó mejor, del polígono convexo que se puede siempre formar reuniendo los puntos de apoyo por medio de líneas rectas, si los puntos fijos son más ó ménos numerosos. En las figuras 161 y 162 tenemos muchos ejemplos de ello. Las torres inclinadas de Bolonia y Pisa (fig. 5) son tambien ejemplos singulares de equilibrio, debidos á la circunstancia de que el centro de gravedad del edificio se halla en una vertical que cae á un punto interior de la base. Pero se comprende que los materiales de que se componen esas torres están unidos entre sí de modo que no pueden obedecer separadamente á la fuerza que ocasionaria su caida.

Ese aguador, ese mozo de cordel representados en la fig. 163, toman posturas inclinadas ó hácia delante, y tales, que el centro de gravedad del conjunto formado por su cuerpo y la carga que este sostiene queda en una vertical formada por los piés del conductor. Lo propio sucede con ese carro que rueda por un camino inclinado trasversalmente (fig. 164); conserva el equilibrio miéntras su centro de gravedad subsiste verticalmente sobre la base compren-

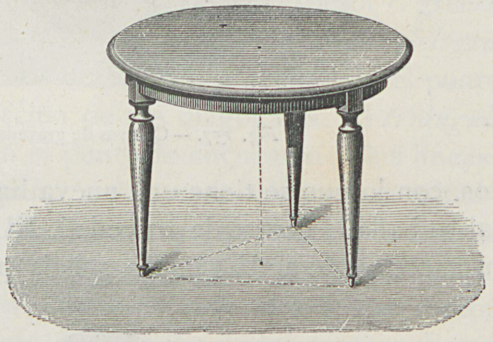


Fig. 162.—Equilibrio de un cuerpo que descansa por tres puntos sobre un plano

dida entre los puntos en que las ruedas tocan el suelo. Volcará si sucede lo contrario, ya por ser demasiada la inclinacion del camino, ó bien por los choques que reciba el vehículo y por las dislocaciones que estos choques producirán en el centro de gravedad, si la velocidad del carro es extremada.

Cuando el cuerpo está sostenido por un eje horizontal, alrededor del cual puede girar libremente, el equilibrio puede ser *estable*, *indiferente* ó *inestable*. Es estable, si el centro de gravedad está debajo del eje; indiferente, si se halla en el eje mismo; é inestable, si encima de él. En la figura 165 tenemos un ejemplo de cada uno de estos casos.

Hay varios aparatos de física, ó si se quiere, juguetes, que sirven para poner en evidencia estas condiciones de equilibrio de los cuerpos,

segun la posicion que ocupan sus centros de gravedad.

El *equilibrista* del grabado 166 es una figurita que se apoya por un punto en la base superior de un zócalo. A cada lado del personaje hay una varilla metálica que termina en una bola pesada, de plomo por ejemplo, varillas que son lo suficientemente largas para que el centro de gravedad de la figura esté más bajo que el plano de suspension. Si se hace oscilar en distintas direcciones la figura, esta se enderezará siempre para recobrar su equilibrio, y en efecto todo el conjunto se halla en el caso del equilibrio estable.

Lo propio sucede con esos juguetes de niño formados por un cilindro de médula de saúco á cuya base va unido un boton de plomo. Si se inclina el cilindro sobre un plano horizontal

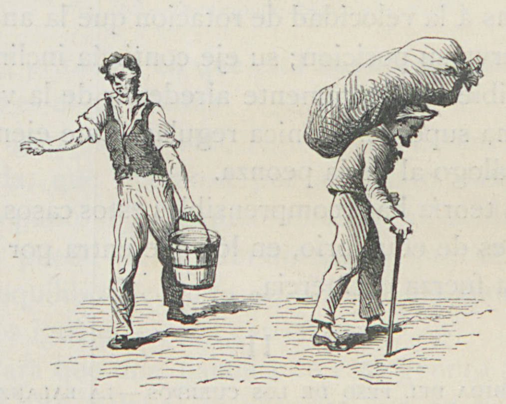


Fig. 163.—Posiciones de equilibrio de dos personas cargadas

de modo que una de sus aristas esté tendida sobre el plano (fig. 167), el centro de gravedad no estará ya en la vertical que pasa por la arista de apoyo; pero vuelve á él bruscamente levantando el juguete, que se coloca de nuevo verticalmente. Los *dominguillos* (fig. 168) son una forma más entretenida dada á dichos juguetes.

Por último, los relojes *mágicos* ó *misteriosos* están construidos en virtud de la misma condicion de equilibrio que hace que el centro de gravedad de un sistema capaz de girar alrededor de un eje fijo propenda siempre á situarse en el punto más bajo. Hé aquí en qué consisten dichos relojes y lo que justifica el calificativo que se les ha dado.

Se componen de un cuadrante circular ó rectangular, lo mismo da (fig. 169), suspendido de un plano vertical por dos hilos metálicos atados á dos puntos de su contorno. Dicho cuadrante es de cristal perfectamente trasparente, y lleva en su centro dos agujas que marcan con regularidad la hora y los minutos, marchando sin ningun mecanismo aparente. Si se da á las agujas, haciéndolas girar con la mano, distinta posicion de la de la hora marcada, vuelven á

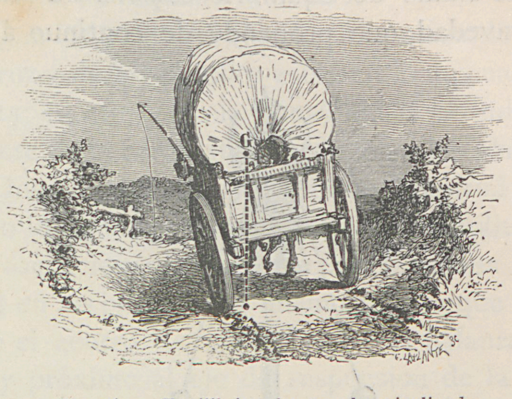


Fig. 164.—Equilibrio sobre un plano inclinado

colocarse en la hora justa despues de oscilar un poco, y si la interrupcion ha durado algun tiempo, se colocan por sí mismas de modo que señalan la hora que deberian señalar si no se las hubiera tocado.

Es muy fácil hacerse cargo de la disposicion mecánica ideada para producir esta marcha al parecer maravillosa.

La aguja de los minutos remata en su extremo posterior en un apéndice á manera de caja de reloj. Este apéndice contiene efectivamente un mecanismo de relojería que pone en marcha un peso adicional de platino y le hace describir una vuelta entera en una hora. El peso de platino va corriéndose por una ranura que rodea

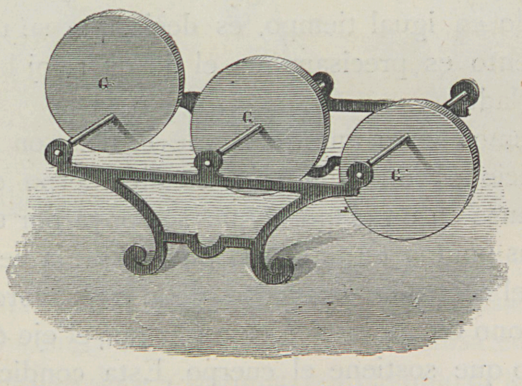


Fig. 165.—Equilibrio inestable, indiferente y estable

la circunferencia de la caja, y cambia á cada momento la posicion del centro de gravedad de todo el sistema de la aguja.

Cuando dicho peso ó bola avanza 15° por la circunferencia de la ranura, y luégo otros 15°, etcétera, el centro de gravedad del conjunto

pasa por puntos simétricamente situados en una circunferencia cuyo centro es precisamente el del cuadrante, es decir, aquel en que está fijo el eje del movimiento de la aguja.

El sistema de la aguja y del peso se halla en el caso citado del equilibrio estable. Su centro de gravedad, que propende de continuo á re-

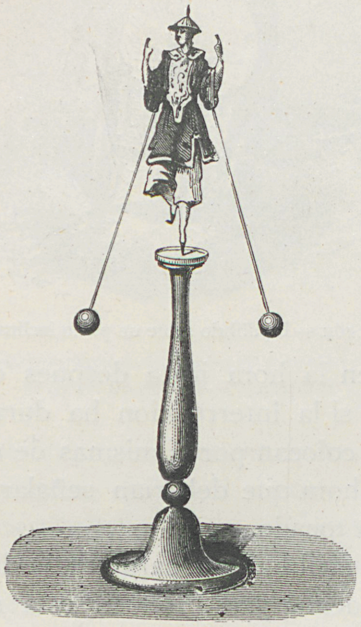


Fig. 166.—Equilibrista

montarse á la derecha, pasa tambien de continuo al punto más bajo, lo cual no puede tener efecto sin que la aguja gire alrededor de su eje, en sentido contrario, y en un ángulo precisamente igual al de la bola de platino. Esta bola invierte cinco minutos en describir 30°; la aguja de los minutos describe el mismo ángulo en igual tiempo, es decir que su movimiento es precisamente el de un reloj bien arreglado.

Hemos visto anteriormente cuáles son las condiciones de equilibrio de un cuerpo que descansa en un plano, ó que se apoya por uno de sus puntos en un eje ó punto fijo: la vertical del centro de gravedad debe caer sobre el polígono de apoyo, ó bien pasar por el eje ó el punto que sostiene el cuerpo. Esta condicion es precisa si se trata de un cuerpo en reposo, pero deja de serlo si este cuerpo está animado de un rápido movimiento de rotacion.

Por ejemplo, una peonza á la que se hace dar vueltas sobre un plano horizontal, tiene por lo general su eje inclinado sobre dicho plano, y permanece de esta suerte en equilibrio, miéntras es suficiente la velocidad de su movimiento de rotacion. Pero al mismo tiempo que su eje está inclinado, se le ve cambiar de lugar y describir un cono alrededor de la vertical (fig. 170), proporcionando así una representacion gráfica del lento fenómeno que hemos descrito con el nombre de precesion de los equinoccios.

Hé aquí otro ejemplo singular de equilibrio de los cuerpos en movimiento. Un disco metálico M (fig. 171) puesto sobre un eje OA descansa por su extremo O en una peana, estando el otro extremo al alcance de la mano. Dase al disco así situado un rápido movimiento de rotacion, y en seguida se le abandona á sí mismo, soltando el extremo A de su eje. Si en tal posicion estuviese inmóvil la masa M, se la veria caer siguiendo la vertical de su centro de gravedad y girando alrededor del extremo O; pero gracias á la velocidad de rotacion que la anima, conserva su posicion; su eje continúa inclinado describiendo lentamente alrededor de la vertical una superficie cónica regular. Este ejemplo es análogo al de la peonza.

La teoría hace comprensibles estos casos singulares de equilibrio, en los que entra por mucho la fuerza de inercia.

II

MEDIDA DEL PESO DE LOS CUERPOS.—LA BALANZA DE PRECISION

Determinar el centro de gravedad de un conjunto de cuerpos pesados es un problema

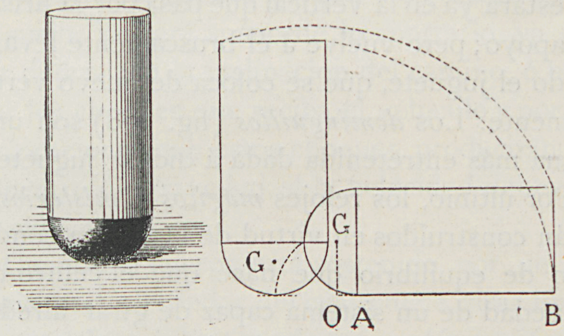


Fig. 167.—Movimiento del centro de gravedad (equilibrio estable)

que tiene diariamente múltiples aplicaciones en las artes y en las diferentes industrias. Pero hay otra cuestion no ménos útil é interesante, cual es la que tiene por objeto medir la intensidad de la resultante cuyo punto de aplicacion es el centro de gravedad, ó valiéndonos del lenguaje usual, pesar los cuerpos.

Los instrumentos destinados á este uso han recibido, como nadie ignora, el nombre de *balanzas*. Las balanzas usadas varían mucho en sus formas y en su género de construccion; más adelante las describiremos en detalle. Empecemos por la descripcion de la balanza de precision, única que se usa en las investigaciones científicas.

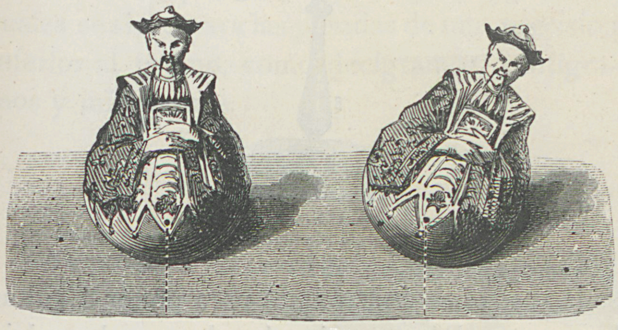


Fig. 168. —Dominguillos (equilibrio estable)

El principio en que está basada su construccion es el siguiente:

Figura en primer lugar una palanca, barra rígida, que descansa por su punto medio en otro punto fijo, inquebrantable, alrededor del cual puede oscilar libremente, y que se halla en equilibrio cuando se ponen dos fuerzas ó pesos iguales en sus extremos.

Para que una palanca de este género pueda servir de balanza se requiere que en su construccion no se hayan omitido ciertas condiciones de las que vamos á tratar.

Es ante todo preciso que los dos brazos de la palanca ó cruz (fig. 172) AO, OB, sean de igual longitud y del mismo peso, de modo que se equilibren aisladamente. Tambien deben tener exactamente el mismo peso los dos platillos PP, en uno de los cuales se colocan las pesas contrastadas, y en otro los cuerpos que se han de pesar. En segundo lugar, el centro de gravedad del sistema debe estar debajo del punto ó del eje de suspension, y muy próximo á este eje. Resulta de esta segunda condicion que el equilibrio será estable, y que las oscilaciones de la cruz propenderán siempre á hacerla recobrar una posicion horizontal, que es la señal característica de la igualdad de peso de los cuerpos situados en los dos platillos de la balanza.

Estas dos condiciones son las únicas necesarias para que la balanza sea exacta, pero no bastan para que sea tambien sensible, es decir, para que marque hasta la menor disparidad en el peso, en virtud de una inclinacion de la cruz fácil de comprobar.

Para que una balanza sea muy exacta y muy sensible, se requiere además:

Que los puntos ó ejes de suspension del ástil ó cruz y de los platillos estén en la misma línea recta; en este caso la sensibilidad es independiente de la carga que se ponga en los platillos;

Que la cruz tenga bastante longitud y sea todo lo ligera posible; entónces la amplitud de las oscilaciones será mayor para la misma igualdad en los pesos; es el mismo motivo que exige que el centro de gravedad de la balanza esté muy próximo al eje de suspension de la cruz, sin que á pesar de esto coincida con él.

Demostremos ahora cómo se realizan estas condiciones en las balanzas de precision usadas por los físicos y químicos.

La cruz (fig. 173) se compone de un losanje cortado de una pieza en una placa metálica de acero ó de bronce, y vaciado de modo que sin aumentar su flexibilidad se disminuya su peso. Por su parte media pasa un prisma de acero, cuya

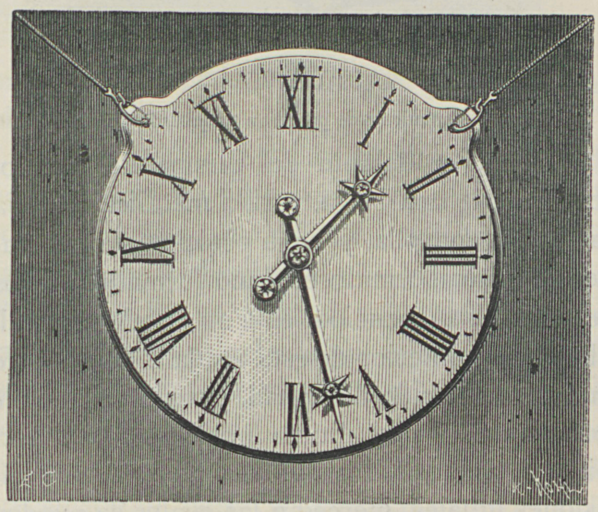


Fig. 169. —Reloj mágico de M. Robert

arista horizontal forma el eje de suspension de dicha pieza ó *cruz*. Esta arista descansa en una superficie dura y bruñida, por ejemplo de ágata. Los dos extremos de la cruz llevan dos prismas pequeños, pero cuyas aristas, horizontales tambien y paralelas á las del prisma principal, soportan los planos de acero movibles, de los cuales se suspenden las varillas que sostienen los platillos.

Las tres aristas de que hablamos deben estar

rigurosamente alineadas en un mismo plano y sus distancias han de ser estrictamente iguales.

Encima y debajo de la cruz hay dos botones superpuestos, uno de los cuales está abierto á modo de tuerca, de suerte que se le puede bajar ó subir como se quiera. Hácese uso de él para levantar ó bajar el centro de gravedad de la palanca, acercándola ó alejándola del eje de suspension y dando así al instrumento el grado de sensibilidad que se desee. El otro boton tiene un agujero fuera de su centro, de suerte que su masa está repartida con desigualdad alrededor del eje; dándole vuelta se puede ejercer cierta influencia sobre uno ú otro brazo de la cruz, compensando así cualquier desigualdad de peso pasajera, que proceda por ejemplo de imperceptibles granillos de polvo acumulados en uno de los platillos.

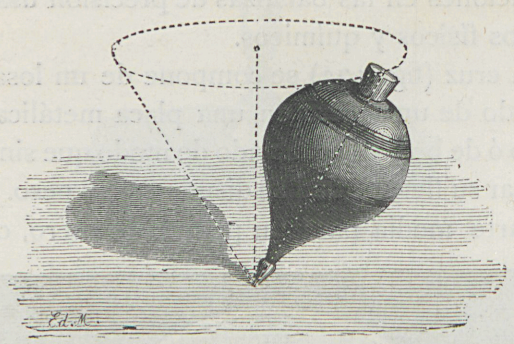


Fig. 170.—Movimiento de precesion y equilibrio del trompo

Por cima y delante del prisma del medio, tiene la cruz una larga varilla metálica ó aguja que oscila con ella, y cuya posicion es exactamente vertical cuando el plano formado por los tres ejes de suspension es á su vez horizontal. El extremo inferior de esta aguja ó fiel recorre un arco de círculo de marfil, cuya division *cero* corresponde á esta última posicion y la determina. A ambos lados del cero hay trazadas divisiones iguales, merced á las cuales se pueden medir las amplitudes de las oscilaciones de la aguja; basta que estas amplitudes sean iguales á cada lado, para que se tenga la certidumbre de la horizontalidad de la cruz en el caso de equilibrio, y por consiguiente de la igualdad de los pesos que hay en los platillos.

Una balanza construida de esta suerte debe ponerse en un plano fijo, pudiendo cerciorarse de que su posicion es perfectamente horizontal por medio de los tornillos que lleva la peana del instrumento y observando el fiel ántes de hacer alguna pesada. Para evitar la influencia de las corrientes de aire y las causas de deterioro originadas por la humedad ó por otros agentes atmosféricos, se la guarda en una caja de cristal que se cierra miéntras se hace la pe-

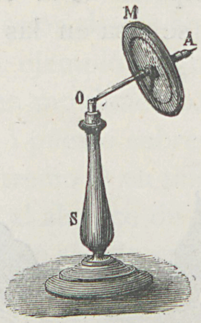


Fig. 171.—Movimiento giroscópico

sada y se abre únicamente para poner ó quitar las pesas. Pónese además cloruro de calcio dentro de la caja, con objeto de que absorba la humedad del aire que pueda haber en ella.

Por último, cuando no se ha de hacer uso de la balanza, se levanta la cruz mediante una barra metálica dentada que remata en una horquilla y que va metida en el interior de la columna. De esta suerte, los prismas conservan intactas sus aristas que á la larga se desgastarian por efecto de la presion si no se tomara esta precaucion.

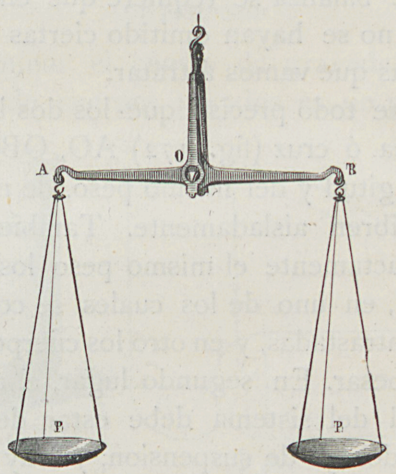


Fig. 172.—Balanza

Vése con cuanto rigor se han reunido en el instrumento que acabamos de describir las condiciones de exactitud de una balanza destinada á usos científicos. La precision que de ello resulta es indispensable para las delicadísimas pesadas que requieren los experimentos de química ó de física moderna. Pero estas condiciones no bastan: es preciso además que el opera-

dor agregue á ellas la destreza que da la práctica y ciertas precauciones en cuyo detalle no podemos entrar. Es innecesario decir que la precision de la balanza seria infructuosa si las pesas no fuesen de rigurosísima exactitud. A veces, además de la escala de las pesas medias, el experimentador posee una coleccion de diminutas pesas que ha construido él mismo con alambres de platino muy delgados y de las cuales se sirve para las pesadas de una precision inferior al gramo, como decígramos, centígramos y milígramos.

En la balanza representada en la figura 174, su constructor M. Hempel ha introducido una innovacion que evita los tanteos cuando se ha obtenido el equilibrio con una levísima diferencia de peso. Debajo de los botones de tuerca se ve un semicírculo graduado recorrido por una aguja horizontal, la cual se puede hacer mover desde fuera de la caja. Los grados corresponden á milígramos, de suerte que colocando la aguja en las divisiones 1, 2, 3..... del cuadrante izquierdo, es como si se pusiera en el platillo de la izquierda 1, 2, 3..... milígramos.

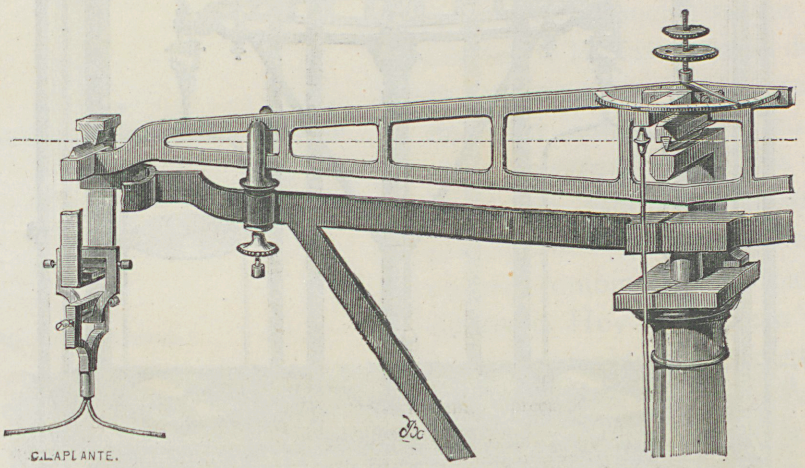


Fig. 173.—Balanza de precision

Hoy se construyen balanzas bastante sensibles para que las haga oscilar un exceso de peso de un milígramo, aunque estén cargadas con 5 kilógramos en cada platillo. En las balanzas de análisis química se pesan hasta décimos de milígramo; pero entónces la carga total debe ser muy débil, por ejemplo, de dos gramos.

Los físicos emplean generalmente el método llamado de *dobles pesadas* para obviar el defecto de igualdad de los brazos de la cruz, porque en efecto, es casi imposible obtener esta rigurosa igualdad áun con los aparatos más perfectos. Consiste este método en poner en un platillo el cuerpo cuyo peso se busca y en equilibrarle colocando en el otro perdigones. En este estado, si los brazos de la cruz no tienen rigurosamente la misma longitud, el equilibrio no prueba la igualdad de los pesos. Pero si quitando el cuerpo, se ponen en su lugar pesas conocidas hasta que se restablezca de nuevo el equilibrio, fácilmente se comprende que estas pesas representan exactamente el peso buscado, que producen el mismo efecto que el cuerpo y en idénticas circunstancias.

Hemos visto que puede modificar el peso de un cuerpo el medio en que está sumergido, de suerte que este peso resulta disminuido en una cantidad igual al del flúido ó aire que desaloja. Por otra parte, su volúmen varía con la temperatura, y de consiguiente un mismo cuerpo no desaloja siempre igual cantidad de flúido: de aquí la necesidad de tener en cuenta estos elementos de variacion, á no ser que se tome la precaucion de hacer las pesadas en un espacio sin aire, es decir, en el vacío.

III

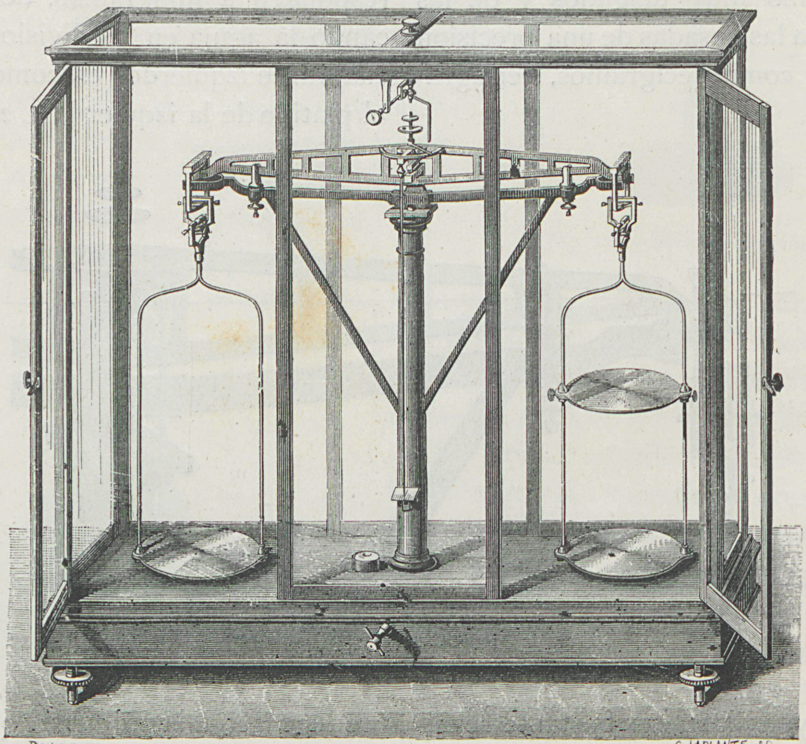
BALANZAS USADAS EN EL COMERCIO Ó EN LA INDUSTRIA

Acabamos de describir la balanza de precision, la única usada para determinar científicamente las pesadas que requieren gran exactitud. Pero hay otros tipos de balanzas construidas con ménos cuidado, sólo para obtener una aproximacion menor y que se emplean mucho más

en las transacciones comerciales é industriales: vamos á describir rápidamente las más usadas, sin insistir en los detalles de su construccion, por ser de incumbencia de la mecánica práctica más bien que de la física.

La *romana* es uno de los tipos conocidos desde más remota fecha (1). Su construccion, muy sencilla, se basa en el principio de mecánica de que el peso de dos cuerpos graves que actúen en los extremos de dos brazos de palanca desiguales están en razon inversa de las longitudes de los brazos de palanca, cuando se restablece el equilibrio.

La cruz de la romana AB (fig. 175) consta de dos partes, la más corta de las cuales forma un brazo de palanca de longitud constante, de



BONNAFOUX C. LAPLANTE. SC

Fig. 174. — Balanza de precision: modelo Hempel

cuyo extremo pende un gancho ó un platillo en el cual se ponen los cuerpos que se han de pesar. En la parte más larga OB, convenientemente dividida en kilógramos y fracciones de kilógramo, corre una anilla M que sostiene un peso P siempre el mismo; y este peso es el que, segun avanza ó retrocede á lo largo de la barra dividida, equilibra los cuerpos graves puestos en el platillo Q ó suspendidos del gancho. Reconócese que se ha hecho el equilibrio cuando la barra recobra su horizontalidad despues de oscilar un tanto.

La romana suele estar construida de modo que el centro de gravedad de todo el aparato se encuentre en la vertical que pasa por la arista de la cuchilla de suspension y algo por encima de ella. Entónces, si no tiene la pesa P ni ningun peso en el platillo, la barra permanece en equilibrio tomando una posicion horizontal.

Así pues, el cero de la gradacion está en el mismo punto de suspension. Para trazar las divisiones se pone un peso conocido, por ejemplo de un kilógramo, en el platillo y se busca el punto de la barra donde la pesa produzca el equilibrio: en este punto se marca un kilógramo. La distancia comprendida entre 0 y 1, graduada en divisiones decimales y marcada sucesivamente en el brazo mayor de la palanca, da la gradacion de la romana. Es una balanza bastante cómoda, porque no requiere pesas marcadas, y es á propósito para pesar cuerpos voluminosos, cuando no se requiere una exactitud rigurosa. Como es poco sensible, no está legalmente autorizado su uso sino

(1) «Llámase así, no porque la usaran los romanos, como se ha supuesto, pues los romanos no la conocian, sino porque procede de los árabes, que llaman *romano* (granada) á la única pesa de esta balanza.» (Hœfer, *Historia de la Física*.) — La balanza de dos brazos iguales es de invencion antiquísima. Homero alude á ella muy claramente en la *Iliada*, y se ignora quién fué su inventor.

cuando oscila por efecto de un exceso de peso igual á la 500.ª parte de su carga máxima.

La *balanza de báscula* (fig. 176) ó de *Quintnez* (nombre de su inventor) se basa en el mismo principio que la romana, actuando el cuerpo que se ha de pesar y las pesas en el extremo de brazos de palanca desiguales. Pero difiere de ella en que estos dos brazos son de longitudes variables y en que el cuerpo que se ha de

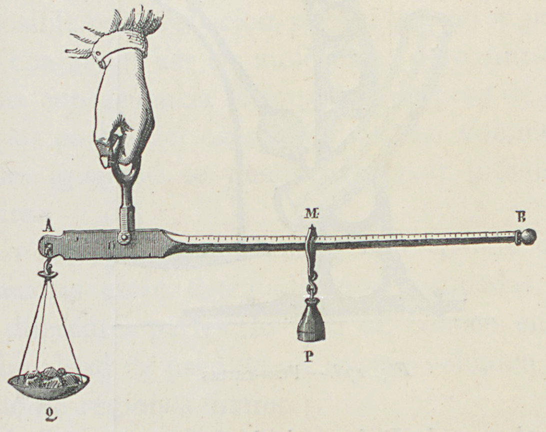


Fig. 175. — Romana

pesar gravita en el extremo del brazo más corto; por lo tanto, la balanza de báscula exige, como las ordinarias, una serie de pesas; mas el peso de estas es menor que el de los objetos: por ejemplo, si la relacion de las palancas OB y OC es de 1 á 10, se equilibrarán los cuerpos pesados con pesas diez veces más cortas. Los objetos cuyo peso se busca se colocan en la plataforma DE, y las pesas en el platillo *abc*. Hay equilibrio cuando las puntas *mn* se encuentran frente á frente.

La plataforma DE descansa mediante una arista horizontal I en una pieza KL que viene á ser una palanca movible alrededor de K y obra por la articulacion LA en el brazo OA de la cruz; descansa por otro punto en la pieza T unida por medio de una varilla vertical al punto B de la palanca OB. Haciendo que las distancias IK y KL sean proporcionales á OB y OA, resulta de esta disposicion que la plataforma DE, horizontal ántes de colocar en ella el cuerpo que se ha de pesar, continúa tambien horizontal cuando dicho cuerpo la haga bajarse con su peso; ó lo que es lo mismo, el movimiento del punto A estará con el movimiento del punto B en la misma relacion que los brazos de palanca OA y OB, resultando finalmente la consecuencia de que la accion del peso del cuerpo, que se halla repartida entre B y A, es la misma que si se ejerciera enteramente en B: ahora bien, suponiendo que la palanca OB es la décima parte de la longitud OA, tendremos que, en nuestra hipótesis, bastarán para equilibrar el peso del objeto pesas diez veces más ligeras que este. Por ejemplo, si se establece el equilibrio con pesas que tengan en junto 5,400 kilógramos, el peso real del cuerpo será de 54 kilógramos.

Las balanzas de báscula, en las cuales se han introducido varias innovaciones desde su invencion, se usan mucho en los despachos de mercancías de las vías férreas, de las mensajerías y en los almacenes del comercio. Cuando se queria pesar antiguamente en Francia carros ó wagones cargados se hacia uso de los *puentes de báscula*, especie de balanzas basadas en un principio análogo al de las de Quintnez, es decir, en una combinacion de palancas de longitud diferente. Hoy se emplean todavía en algunos países extranjeros los puentes de báscula ó *balanzas de Sanctorius*, así llamadas del nombre del sábio italiano que las inventó.

Hay otra clase de balanza (fig. 177) que se usa para pesar materias ligeras como cartas (en este caso se le da el nombre de *pesa-cartas*), y en las fábricas de tejidos, la seda, la lana y el algodon.

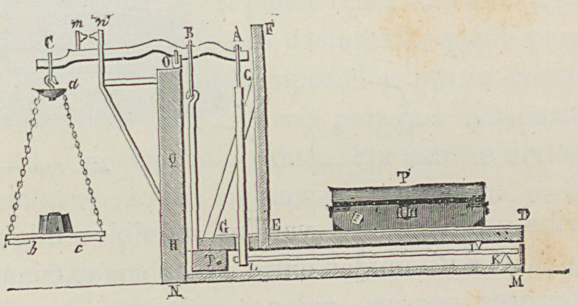


Fig. 176. — Balanza de báscula ó de Quintnez

Consiste en una palanca AB, que puede girar alrededor del punto O. Uno de los brazos A sostiene el platillo en que se ponen las materias que se han de pesar. En O hay una aguja fijada á la palanca en ángulo recto. Cuando no hay nada en el platillo la palanca AB está en posicion horizontal y la aguja en la vertical; pero si se coloca algun cuerpo en aquel, la accion de este peso en el extremo del brazo de palanca OA hace que la aguja recorra las divi-

siones de un arco de círculo oportunamente graduado. La gradacion se deduce de un principio mecánico muy sencillo, á saber: que los pesos puestos en el platillo son proporcionales, no á los ángulos que la aguja forma con la vertical, sino á las tangentes de estos ángulos, es decir, á las distancias CT, CT'..... que la direccion de la aguja prolongada determina en la línea horizontal trazada desde el punto C, línea que entónces es tangente al arco de círculo descrito desde el punto O como centro.

La figura 178 representa la forma que se suele dar á esta balanza cuando se la usa para pesar cartas.

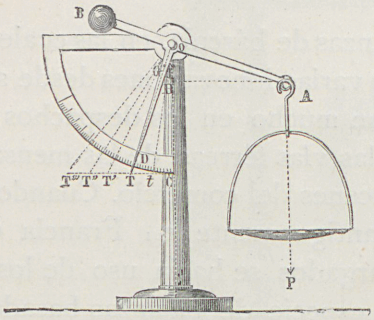


Fig. 177. — Balanza para pesos ligeros

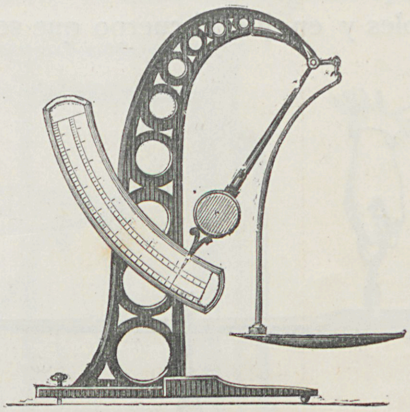


Fig. 178. — Pesa-cartas

Terminaremos esta descripcion de los instrumentos de pesar usados en el comercio y en la industria, añadiendo algunas palabras sobre la *balanza de Roberval* (fig. 179). Los dos platillos descansan, en la parte superior de la cruz, en dos cuchillas cuyos filos están vueltos hácia

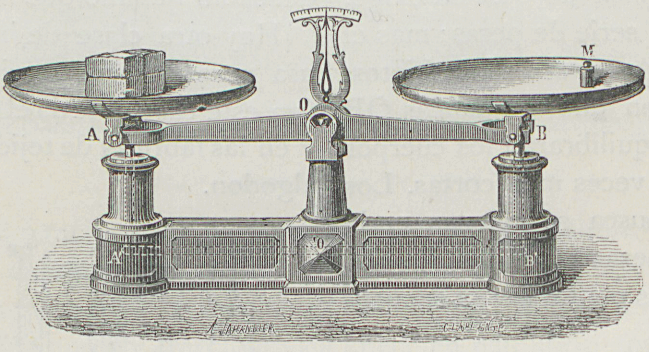


Fig. 179. — Balanza de Roberval

arriba y fijos en dos varillas movibles é iguales, AA' BB', unidas entre sí, en sus extremos inferiores, por una palanca asimismo movible alrededor de su punto medio. Esta disposicion, que no altera en nada las condiciones de equilibrio, como se demuestra en mecánica, hace muy cómodo el uso de esta balanza. En efecto, se colocan y quitan los cuerpos que se han de pesar, así como las pesas, sin los inconvenientes que ofrecen las balanzas comunes á causa de las cadenillas ó cordones que sostienen los platillos.

Hoy es muy general el uso de la balanza de Roberval.

IV

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE LOS CUERPOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Nadie ignora que varias sustancias, á igualdad de volúmen, distan mucho de tener el mismo peso; una piedra pesa bastante más que un pedazo de madera y ménos que uno de hierro de la misma dimension; un litro de agua, más pesado que uno de aceite, lo es mucho ménos que otro de mercurio. Los números que expresan esta diferencia característica entre los cuerpos de distinta composicion son lo que se llama *pesos específicos* ó *densidades*. Pero demos una definicion más precisa.

Para ello, establezcamos una distincion entre las sustancias homogéneas y las heterogéneas. En este caso, debemos entender la homogeneidad con relacion á sustancias de tal estructura, que las moléculas de que están formadas se hallan uniforme y simétricamente situadas, de suerte que su número sea el mismo en todas las partes del cuerpo y á volúmenes iguales, por pequeños ó grandes que sean estos volúmenes. No cabe duda que esta hipótesis es de imposible comprobacion, puesto que no se pueden contar ni ver las moléculas; pero implica como consecuencia la igualdad de peso de todas las partes del cuerpo iguales en volúmen, y esta igualdad se puede averiguar prácticamente.

Un cuerpo no es homogéneo cuando sus moléculas están desigualmente agrupadas en sus diferentes partes; lo cual se conoce en la desigualdad de peso de un mismo volúmen tomado en regiones distintas.

Hecha esta distincion, consideremos ante todo varios cuerpos homogéneos, sólidos ó líquidos, y supongamos que de cada uno de ellos se saca un volúmen igual, un centímetro cúbico por ejemplo, y que se le pesa con cuidado. Así se obtendria una serie de pesos por lo comun desiguales, y estos pesos son los que se llaman *pesos específicos* de las sustancias correspondientes.

Así como en nuestro sistema métrico se ha tomado por unidad de peso el de un centímetro cúbico de agua, el peso específico del agua estará precisamente expresado por el número 1, lo cual equivale á tomarlo por unidad de los pesos específicos de los líquidos y de los sólidos. Pero no debe olvidarse que el gramo es el peso de un centímetro cúbico de agua destilada, pesado en el vacío á + 4 grados de temperatura del termómetro centígrado; que, por otra parte, el volúmen de un cuerpo varía con su temperatura, y por consiguiente tambien su peso específico, y que estas variaciones son diferentes segun las sustancias. Háse convenido por tanto en referir los pesos específicos de varios cuerpos (excepto únicamente el del agua) á la temperatura comun de 0°; en el caso de que la temperatura fuese otra, importa indicarlo así.

Así pues, la definicion del peso específico de un cuerpo homogéneo, sólido ó líquido, es la siguiente: es la relacion que existe entre el peso de la unidad de volúmen de este cuerpo á 0 grados, y el de la unidad de volúmen del agua destilada á + 4 grados.

Si en lugar de comparar los pesos de los cuerpos partiendo de la unidad de volúmen, se hiciera la misma comparacion relativamente á sus masas, las cifras que se obtuvieran serian lo que se llama sus *densidades*. No se debe confundir la densidad de un cuerpo con su peso específico, pues, como se ha visto, el peso varía con la intensidad de la gravedad, es decir, con la latitud ó la altitud del lugar, al paso que la masa es invariable. Pero como las relaciones de los pesos son iguales á las de las masas, síguese de aquí que los números que representan los pesos específicos son tambien iguales á los que expresan las densidades, por lo cual se emplea indistintamente una ú otra de ambas expresiones.

De la definicion del peso específico ó de la densidad resulta que el peso de un cuerpo es igual al producto de su volúmen por su densidad, y por consiguiente, dados dos de estos elementos, el tercero se deduce por un simple cálculo.

La definicion precedente es aplicable á los cuerpos homogéneos; pero no á los que no lo son. En los cuerpos heterogéneos, cada parte considerada de por sí puede tener una densidad propia si su volúmen es bastante pequeño para que la variacion de composicion pueda considerarse como nula, es decir, para que esta parte sea en sí misma homogénea. Por esto se divide el globo terráqueo en capas concéntricas, cada una de las cuales se supone homogénea, y cuyas densidades van creciendo á medida de la proximidad de dichas capas al centro. Por lo que hace á la densidad de la Tierra, es un término medio entre las densidades de sus capas; equivale á la que tendria un globo de iguales masa y volúmen, pero cuya materia estuviese uniformemente distribuida.

No creemos necesario encarecer el interés que tiene la determinacion de la densidad propia de cada especie de cuerpo, de cada clase de sustancia, sólida, líquida ó gaseosa. Aparte de que merced á ella se pueden resolver los variadísimos problemas en que este elemento desem-

peña un papel esencial (por ejemplo, el que tiene por objeto calcular el volúmen de un cuerpo de forma irregular, pero que se puede pesar, ó tambien el que consiste en calcular el peso de un cuerpo cuyo volúmen es posible medir, pero que no se puede poner en una balanza), el conocimiento exacto de la densidad

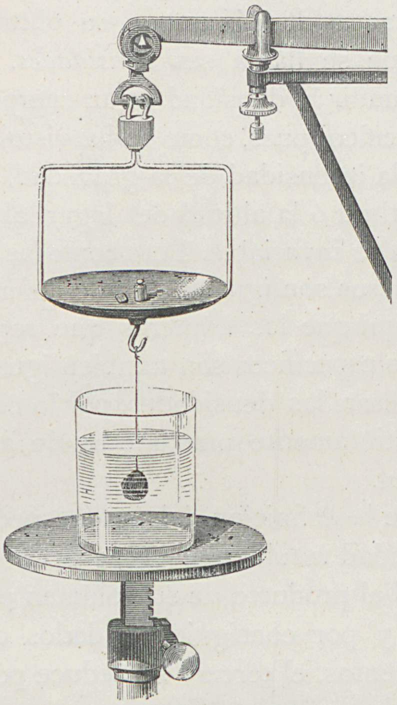


Fig. 180.—Densidad de los cuerpos sólidos. Método de la balanza hidrostática

es un medio precioso con que cuenta el mineralogista para distinguir las especies minerales; es un carácter distintivo que sirve de mucho á los químicos, á los farmacéuticos para comprobar la pureza de las sustancias que emplean.

Por todos estos motivos se comprenderá que abordemos con algunos detalles la descripcion de los procedimientos que sirven para determinar la densidad de los cuerpos. Por de pronto nos limitaremos á la densidad de los sólidos y de los líquidos.

Acabamos de decir que la densidad de un cuerpo es la relacion que existe entre su peso á 0 grados y el de un volúmen igual de agua pura á la temperatura de +4 grados del termómetro centígrado. ¿Qué se necesita pues para averiguar el número que representa la densidad de un cuerpo? En primer lugar, conocer su peso (la balanza sirve para esto); luégo conocer el peso de un volúmen igual de agua: vamos á describir las operaciones propias para esta determinacion. Obtenidas estas dos cantidades, el cociente de la division del primero por el segundo dará la densidad.

La única dificultad consiste en hallar el peso de un volúmen de agua igual al del cuerpo. Valgámonos de algunos ejemplos que nos harán comprender los tres métodos usados.

Sea un pedazo de hierro que pese al aire libre 246 gr,5. Se le suspende por medio de un hilo muy fino del gancho de uno de los platillos de la balanza hidrostática, y se pone un peso igual en el otro platillo para equilibrarlo: entónces se baja la cremallera ó barra dentada de la balanza hasta que el pedazo de hierro se sumerja en el agua (fig. 180). En este momento el fiel se inclina hácia el lado de la tara, y para restablecer el equilibrio hay que poner pesas equivalentes á 31gr,65 en el platillo que sostiene el cuerpo. Estas pesas representan el peso del agua desalojada. Dividiendo 246,5 por 31,65 resulta 7,788 como densidad del hierro; lo que equivale á decir que el hierro pesa, á igualdad de volúmen, 7 veces y 788 milésimas tanto como el agua.

Véase ahora un segundo método:

La figura 181 representa un instrumento llamado *areómetro* (1), ideado por el físico Charles, áun cuando se atribuye generalmente á Nicholson; está construido de tal suerte que sumergido en el agua enrasa precisamente en un punto marcado en su vástago superior, cuando

(1) Del griego *araios*, ligero, y *metron*, medida. Los areómetros sirvieron primeramente para medir las densidades de los líquidos, como más adelante veremos.

Todo el mundo conoce la anécdota de Arquímedes, cuando al salir del baño echó á correr por las calles de Siracusa, gritando como un loco: «*¡Eureka, eureka!* ¡He dado con ello!» Tratábase de un problema cuya solucion le habia encomendado el rey Hieron, y que consistia en averiguar si en una corona que un platero habia entregado á dicho monarca asegurándole que era de oro puro, habian entrado ó no otras materias. El descubrimiento del principio hidrostático que lleva el nombre del inmortal geómetra le puso sobre la vía, y este conoció que en la construccion de la corona se habia mezclado con el oro cierta cantidad de plata. Dícese que Arquímedes hacia poco caso de las aplicaciones prácticas de la geometria y de las ciencias; pero la verdad es que estuvo muy léjos de desdeñarlas, citándose una multitud de inventos debidos á su genio. Atribúyesele el de los areómetros, instrumentos basados inmediatamente en el principio de que todo cuerpo sumergido ó flotante en un líquido desaloja cuando se restablece el equilibrio un volúmen de líquido que tiene precisamente un peso igual al peso del cuerpo; este mismo principio, descubierto y demostrado por Arquímedes, fué el que le facilitó la solucion del problema de la corona. Otros historiadores científicos han considerado como autora del descubrimiento de los areómetros á la bella y sábia Hipatia, desdichada víctima del fanatismo religioso de los monjes de Alejandría. Lo que parece más cierto es que estos pequeños aparatos, tan preciosos, deben su forma actual á Homberg, físico moderno.

en el platillo que lo remata se pone un peso conocido, por ejemplo 100 gramos. Colócase el cuerpo cuya densidad se desea averiguar en este pequeño platillo, y se añaden pesas hasta conseguir el enrase. Si se han puesto por ejemplo 35,8 gramos, la diferencia 64,2 gr. entre este último peso y 100 gramos da evidentemente el peso del cuerpo en el aire.

Lo que precede demuestra que el areómetro es una verdadera balanza. Se quita el objeto puesto en el platillo superior y se le coloca en el vasito colgado debajo del instrumento; entónces pierde de su peso, de suerte que el areómetro sube, y hay que añadir pesas para restablecer el enrase; por ejemplo 31 gramos. Tal es el peso de un volúmen de agua igual al del

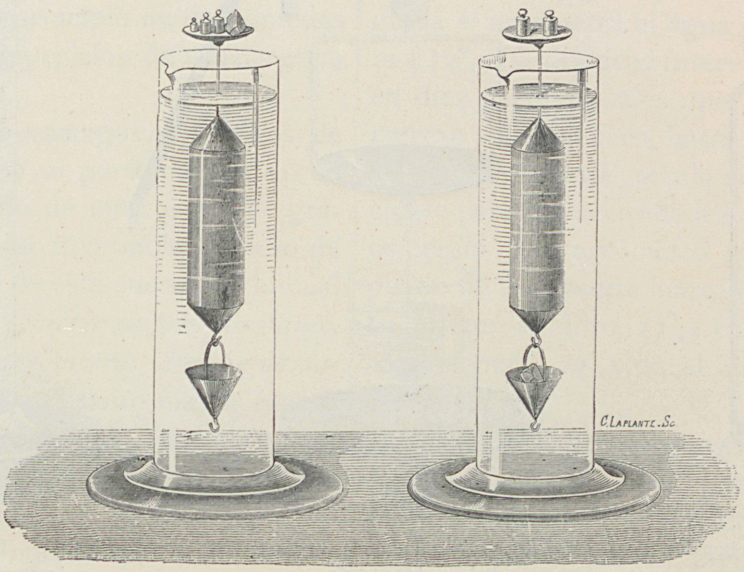


Fig. 181.—Densidad de los cuerpos sólidos. Areómetro de Charles ó de Nicholson

cuerpo. Dividiendo 64,2 por 31, resulta 2,07, densidad que se busca (es la del azufre).

En el caso de que el cuerpo sea ménos denso que el agua, se da vuelta al vasito inferior poniéndolo del revés, y como el cuerpo que tiende á sobrenadar encuentra en él un obstáculo, continúa sumergido como ántes.

El tercer método para averiguar la densidad de los sólidos es el del frasco. Se pone en el platillo de una balanza el fragmento del cuerpo cuya densidad se desea saber, y junto á él un frasco exactamente lleno de agua muy bien tapado con un tapon esmerilado (fig. 182). En seguida se ponen pesas en el otro platillo para equilibrar la balanza. Entónces se quita el frasco del platillo, se introduce el cuerpo en él y se le vuelve á tapar, cuidando de meter el tapon hasta el mismo nivel. Del frasco ha debido salir cierta cantidad de agua cuyo volúmen es precisamente igual al del objeto que ha ocupado su puesto. Despues de secar bien el frasco por fuera, se le pone de nuevo en el platillo de la balanza, y las pesas que es preciso quitar para restablecer el equilibrio representan el peso del agua expulsada. Como se ve, este procedimiento no es otra cosa sino una aplicacion del principio de Arquímedes, como los dos primeros.

Estos tres métodos requieren algunas precauciones: el cuerpo sumergido en el agua retiene adheridas á su superficie algunas burbujas de aire que importa expulsar. Si el cuerpo absorbe fácilmente el agua ó si se disuelve en ella, hay que hacer uso de otro líquido, por ejemplo, de aceite; pero como de este modo se obtiene la densidad del cuerpo relativamente al aceite, hay que averiguar la relacion de este resultado con respecto á la densidad del agua, cosa que no ofrece dificultad.

La densidad de los líquidos se averigua por procedimientos análogos á los que acabamos de describir. Del platillo de la balanza hidrostática se cuelga un globo de cristal lastrado de modo que sea más pesado que los líquidos que se han de comparar (fig. 183). Pesado en el aire y luégo en el agua, la diferencia de las pesadas da el peso de un volúmen de agua igual al suyo. Bien enjugado y pesado en el líquido cuya densidad se busca, esta segunda diferencia da el peso de

un volúmen igual del líquido. Dividiendo este último resultado por el primero, da por cociente la densidad desconocida.

El areómetro de Fahrenheit (fig. 184), metido en el agua, requiere un peso dado para llegar al punto de enrase marcado en su vástago. Es obvio que este peso adicional unido al del instrumento marca el peso del volúmen de agua desalojado. Sumergido en otro líquido, por ejemplo en aceite, se obtiene del mismo modo



Fig. 182. — Densidad de los líquidos. Método del frasco

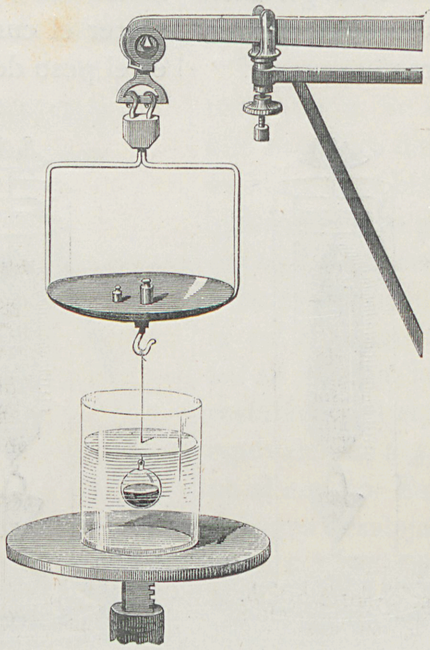


Fig. 183. — Densidad de los líquidos. Balanza hidrostática

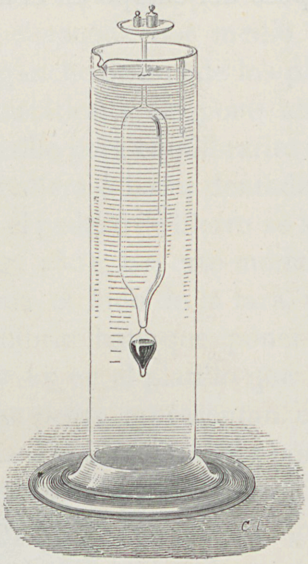


Fig. 184. — Densidad de los líquidos. Areómetro de Fahrenheit

el peso de un volúmen de aceite igual al volúmen de agua. La division de este segundo peso por el primero da la densidad del aceite.

Finalmente, con un frasco terminado en un angosto tubo (fig. 185), y lleno sucesivamente de agua y del otro líquido hasta un punto fijo marcado en su vástago, se averigua el peso de dos volúmenes iguales de agua y del otro líquido, y merced á ellos, la densidad.

Para terminar, insertamos á continuacion un cuadro de las densidades de varios cuerpos sólidos y líquidos de los más conocidos.

DENSIDADES DE DIFERENTES CUERPOS Á 0°. — CUERPOS SÓLIDOS

Metales		Minerales, rocas, etc.			Vegetales, etc.	
Platino laminado	22,06	Diamante		3,53	Boj de Holanda	1,32
Oro fundido	19,26	Mármol	2,65 á	2,84	Corazon de roble	1,12
Plomo fundido	11,35	Granito		2,75	Ebano negro	1,19
Plata fundida	10,47	Cuarzo		2,65	Haya	0,75
Cobre laminado	8,94	Arenisca	2,20 á	2,65	Abeto	0,66
— fundido	8,85	Yeso		2,20	Roble	0,85
Hierro	7,79	Vidrio	2,44 á	2,50	Sauce	0,49
Estaño	7,29	Porcelana		2,24	Alamo	0,39
Zinc laminado	7,19	Azufre		2,09	Alcornoque	0,24
Aluminio	2,56	Hielo		0,93	Médula de saúco	0,08
Níquel	8,64	Espato de Islandia		2,72	Hulla	1,33
Laton	8,24	Flint-glass		3,34	Marfil	1,92

DENSIDADES DE VARIOS LÍQUIDOS Á 0°

Azogue á 0°	13,596	Agua á 4°	1,000	Vino de Borgoña	0,991
Bromo	3,187	Agua á 0°	0,9998	Aceite de oliva	0,915
Acido sulfúrico concentrado	1,848	Agua de mar	1,026	Esencia de trementina	0,869
Acido nítrico (agua fuerte) id.	1,520	Leche	1,032	Alcohol puro	0,795
		Vino de Burdeos	0,999	Eter sulfúrico	0,736

V

PESA-SALES, PESA-ACIDOS, ALCOHOMETROS

Acabamos de describir los areómetros destinados especialmente á medir con la necesaria exactitud las densidades de los cuerpos. Réstanos hablar del uso que se hace en la industria y el comercio de otros aparatos análogos, que llevan el mismo nombre y cuyo objeto consiste en utilizar el principio de Arquímedes para averiguar la composicion de ciertas mezclas.

Por lo regular son vástagos cilíndricos de vidrio, que rematan en su parte inferior en un apéndice globular lleno de mercurio ó de granalla de plomo. Siendo invariable el peso de un aparato construido de esta suerte—á lo cual debe su nombre de *areómetro de peso constante*, por oposicion á los *areómetros de peso variable*,—la parte sumergida es tanto mayor cuanto menor la densidad del líquido, puesto que el líquido desalojado debe tener siempre igual peso que el instrumento.

El agua pura es el líquido que sirve de término de comparacion, y por consiguiente el cero de la graduacion se pone en el punto del vástago en que el instrumento enrasa el agua. Pero en lugar de hacer una sola graduacion para los líquidos ó mezclas más densos que el agua y para los más ligeros, ha parecido más cómodo construir dos clases de areómetros para una y otra categoría.

La figura 186 representa el areómetro de Baumé, llamado *pesa-sales*, *pesa-ácidos*, á veces *pesa-jarabes* ó *pesa-vinagres*, segun sus aplicaciones, porque sirve para averiguar la mayor ó menor concentracion de una solucion salina, la densidad de una combinacion hidratada, es decir, de un ácido y del agua. El cero ocupa un punto de la extremidad superior del vástago; metido el areómetro en una solucion que contenga 15 partes en peso de sal marina y 85 de agua, enrasa en un punto más bajo, donde se marca 15: la division del intervalo de ° á 15° en quince partes iguales, prolongada hasta la parte inferior del vástago, da la graduacion.

El punto extremo del *pesa-sales* de Baumé es 60°; en él se detiene el areómetro sumergido en ácido sulfúrico monohidratado; 36° corresponden al ácido nítrico y 26° al clorhídrico.

El *pesa-licores* (fig. 187), llamado tambien *pesa-alcoholes*, *pesa-espíritus*, *pesa éter*, se usa para comparar los líquidos de menor densidad que la del agua: está construido de modo que, metido en una solucion de 10 por 100 de sal marina, el punto de enrase se halla en la parte inferior del vástago. Hácese la graduacion marcando el cero en el punto de que hablamos; pasando en seguida el areómetro al agua pura á 12°,5, se divide el intervalo en diez partes iguales, que se marcan sobre el cero, hasta los 50° próximamente; escala suficiente para las necesidades del comercio. Un areómetro graduado de esta suerte marca 65° en el éter anhidro, 47°,5 en el alcohol puro, 22°,5 en el amoniaco á 0,92 de densidad.

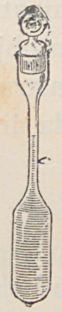


Fig. 185.—Densidad de los líquidos Método del frasco

Las expresiones vulgares: *alcohol á* 36°, *alcohol á* 40° indican, pues, que el *pesa-licores* de Baumé, metido en un líquido alcohólico ó espirituoso, enrasa con las divisiones 36 ó 40 de areómetro graduado de tal suerte.

Construyense areómetros para conocer la riqueza alcohólica de los vinos, en cuyo caso se les da el nombre de *pesa-vinos* ó *enómetros;* otros para conocer si la leche tiene agua ó no, y se les llama *pesa-leche* ó *galactómetros*.

M. Buignet hace notar como sigue, en sus *Manipulaciones de física*, los inconvenientes del sistema de graduacion de Baumé:

«Estos instrumentos están graduados segun ciertas reglas puramente convencionales. Las cifras inscritas en su vástago no tienen relacion alguna con la densidad de los líquidos en que se les introduce, y únicamente se la puede conocer haciendo un cálculo más ó ménos complicado. Verdad es que, para uso de los laboratorios, hay tablas de la densidad correspondiente á cada uno de los grados marcados por estas dos clases de areómetros..... Pero, aparte del inconveniente de no dar el peso específico de los líquidos ni la proporcion relativa de los elementos que lo constituyen, el sistema de graduacion de M. Baumé, tiene los dos siguientes, que no carecen de importancia: 1.° la escala de los areómetros para líquidos más densos que el agua no tiene el mismo punto de partida

que los destinados á líquidos ménos densos; el agua destilada enrasa con el punto 0° en el primer caso y con el 10° en el segundo; 2.° se marcan los grados valiéndose de un agua salada á 15 por 100 cuando se trata de líquidos más densos que el agua, y á 10 por 100 solamente si de líquidos ménos densos. Este es un lamentable defecto de identidad.»

Con objeto de obviar estos inconvenientes se construyen ahora areómetros cuya graduacion da directamente y á primera vista la densidad de los líquidos en que se los sumerge: unos sirven para los líquidos ménos densos que el agua y otros para los que lo son más; pero en razon de su principio y de su uso, han recibido el nombre comun de *densímetros.*

Para graduar los densímetros se los sumerge lastrados en agua destilada, siendo el lastre tal, que el vástago de los instrumentos de la primera categoría enrasa con un punto inmediato al extremo superior, y el de los de la segunda en un punto de la parte más baja. En este

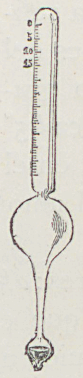


Fig. 186.—Pesa-sales ó pesa-ácidos ó areómetro de Baumé

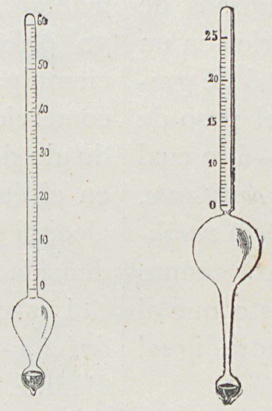


Fig. 187.—Pesa-licores y Pesa-éter

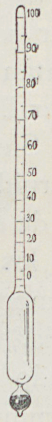


Fig. 188.—Alcoholómetro centesimal de Gay-Lussac

punto de enrase se marca 100 y corresponde á la densidad 1. Luégo se les introduce en un líquido de densidad conocida, 1,25 para los más densos, y 0,80 para los ménos densos que el agua. En los nuevos puntos de enrase se marca 80, cuyo número indica la graduacion en volúmen: divídese el intervalo en 20 partes iguales, siendo evidente que cada grado corresponde á densidades fáciles de calcular. Las cifras deducidas así por el cálculo se marcan además en las divisiones del instrumento, cuya escala indica á la vez los volúmenes y las densidades.

Los densímetros de graduacion doble han sido adoptados por el Código de 1866, juzgándolos preferibles al areómetro de Baumé.

El alcoholómetro centesimal de Gay-Lussac (fig. 188) tiene tambien una gran ventaja sobre el de Baumé; su graduacion no indica tan sólo la fuerza comparativa en alcohol de las mezclas de alcohol puro y de agua, sino que marca instantáneamente la proporcion en centésimas de los volúmenes del espíritu y del agua. Así pues, cuando el instrumento, introducido en una mezcla de dichos líquidos, marca 70°, es que esta contiene en realidad 70 partes de alcohol puro y 30 de agua. Para graduar un areómetro centesimal, Gay-Lussac lo introducia sucesivamente en mezclas que contenian 0, 10, 20, 30..... 100 de alcohol puro, operacion delicada y prolija, porque la mezcla de los dos líquidos origina contraccion de volúmen y elevacion de temperatura, de suerte que era preciso aguardar á que se hubiesen enfriado hasta una misma temperatura (la de 15° centígrados) para calcular la nueva proporcion de los dos volúmenes. Por esto no guardan la misma distancia entre sí los grados de su escala, en lo cual difiere el alcohómetro centesimal de los densímetros que acabamos de describir.

Háse adoptado oficialmente en Francia dicho alcohómetro para medir la fortaleza de los aguardientes, de los espíritus y de todos los licores alcohólicos cuya introduccion paga derechos. En Alemania se usa el de Tralles, que sólo difiere del de Gay-Lussac en la temperatura de la graduacion (60° Fahrenheit ó 15° 5/9 centígrados).

Conviene advertir que de los distintos aparatos cuya descripcion acabamos de hacer, los unos tan sólo indican indirectamente la densidad de las mezclas líquidas en las cuales se les introduce, sin dar á conocer esta densidad (pero se han calculado tablas que la marcan por cada grado), al paso que los otros la demuestran con bastante aproximacion. Pero estos últimos no indican nada acerca de la composicion de la mezcla, que puede sufrir alteracion á causa de la introduccion de sustancias extrañas á su composicion normal.

CAPÍTULO III

LA PRENSA HIDRÁULICA.—LOS POZOS ARTESIANOS

I

PRENSA HIDRÁULICA.—PRINCIPIO Y CONSTRUCCION

Pascal habia demostrado que toda presion ejercida en un punto cualquiera de la masa de un líquido se trasmite con igual energía en todas direcciones; y de aquí dedujo la consecuencia de que, con un esfuerzo relativamente débil, se puede ejercer una presion considerable con tal que se tome un líquido, el agua por ejemplo, por intermediario de esta trasmision, y con tal que el émbolo sobre el cual se ejerce el esfuerzo, se apoye en una superficie del flúido mucho más pequeña proporcionalmente que la del émbolo que recibe la presion; en una palabra, habia probado que la presion se trasmite aumentando en razon de las superficies de los dos émbolos. La *prensa hidráulica* quedaba con esto inventada teóricamente; pero las dificultades de ejecucion no permitieron aplicarla prácticamente. Trascurrió largo tiempo sin que se supiera cómo evitar que el agua se escapara por las junturas de los émbolos, á causa de la fuerza misma con que el líquido, muy compresible como es sabido, era comprimido en el interior del aparato; filtraba por los más leves intersticios.

El ingeniero inglés Bramah halló en 1796 el medio de remediar este inconveniente, medio tan sencillo como eficaz.

La figura 189 representa un modelo de prensa hidráulica, tal como se la emplea hoy en la industria para comprimir ciertas materias. Estas materias C están colocadas entre dos platillos, el uno fijo en el extremo superior de una armazon sólida; el otro, movible entre las columnas de la misma armazon, es impelido en su marcha de abajo arriba por la cabeza de un piston P. Este último va metido en un cuerpo de bomba cilíndrico M, lleno de agua y puesto en comunicacion con una bomba impelente por medio de un tubo. El émbolo *p* de esta bomba es el que recibe la presion que se ha de trasmitir, y el que desempeña el papel del piston más pequeño de la máquina teórica.

Veamos ahora, con auxilio de la misma figura que representa una vista interior de los órganos de la propia máquina, cómo están colocados y funcionan estos órganos.

AB es la bomba impelente ó de inyeccion movida por una palanca y cuyo émbolo impele el agua del depósito *m* al cilindro M. La presion ejercida por el líquido se trasmite al émbolo P y por consiguiente á los objetos colocados en el platillo C.

Para evitar los escapes de agua por las junturas del émbolo P y del cilindro, Bramah ideó dejar en la pared del cilindro una cavidad ó espacio anular *a b*, llenando este espacio con una pieza de cuero primeramente cortada á modo de anillo plano, y luégo encorvada en forma de U invertida en todo su contorno, segun puede verse en la figura 189. El agua que penetra por debajo de este anillo en el espacio circular ejerce su presion sobre toda la cara inferior del cuero, de lo cual resulta que cuanto mayor es la presion con más fuerza se adhiere el anillo contra el cilindro y contra el émbolo á la vez, y más herméticamente cerrada queda la juntura que los separa.

Por lo regular la presion que se ha de ejercer, débil al principio de la operacion cuando los objetos que deben comprimirse son aún poco compactos, ha de ir creciendo á medida

que se está cerca de lograr el objeto propuesto. Consíguese este resultado sin necesidad de modificar la fuerza empleada, para lo cual basta acortar el brazo de palanca de la bomba. La presion depende en efecto de la relacion entre las superficies de los émbolos y de la longitud del brazo de palanca que sirve para manejar la bomba. Así pues, si la superficie del émbolo P es 50 veces mayor que la del émbolo *p*, y la distancia del punto H en el que se ejerce la fuerza de la maniobra al punto G alrededor del cual gira la palanca es 10 veces mayor que GH, la presion total trasmitida será 50 × 10, ó 500 veces la que ejerza el émbolo menor. Si esta última equivale á un peso de 100 kilógramos, la presion ejercida, abstraccion hecha de las pérdidas ocasionadas por el roce, será 500 × 100 ó 50,000 kilógramos.

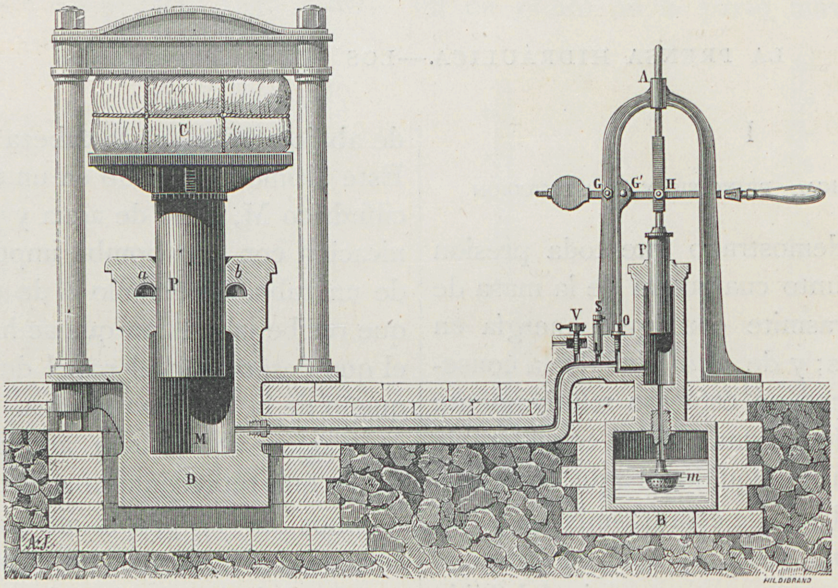


Fig. 189.—Prensa hidráulica

Resulta de aquí que para disminuir esta presion basta alargar la distancia GH, lo cual es muy fácil cambiando de posicion el eje GG', alrededor del cual gira la palanca; acortando la misma distancia, se aumentaria la presion.

Por lo demás, cada máquina está construida con las condiciones de solidez y resistencia combinadas en atencion á las operaciones que debe efectuar.

Los usos de la prensa hidráulica son hoy muy variados; sirve para exprimir los jugos de ciertas plantas, por ejemplo, el aceite de las semillas oleaginosas; parn prensar papel, telas, forrajes que se han de trasportar á grandes distancias y que, comprimidos de este modo, ocupan mucho menor volúmen que ántes de la operacion; se la utiliza en la fabricacion de bujías, de pastas para sopa, etc. Los cables de hierro que se forjan en las fundiciones nacionales para la marina, se someten á varias pruebas con objeto de averiguar su resistencia de traccion, y la prensa hidráulica es la que sirve para comprobar esta resistencia.

La misma máquina ha servido para levantar pesos considerables á grandes alturas. De este modo se han colocado en la parte superior de las pilas del Britannia Bridge los cuatro enormes tubos de hierro laminado que forman el tramo de este puente gigantesco, merced al cual la vía férrea de Chester á Holyhead cruza el brazo de mar que separa la isla de Anglesey del condado de Carnarvon. Cerca de dos millones de kilógramos se han levantado así á una altura media de 33 metros con prensas hidráulicas movidas por vapor.

Debemos hacer mencion de una modificacion muy ingeniosa recien introducida en la prensa hidráulica, la cual consiste en la supresion de la bomba de inyeccion que trasmite al émbolo del cilindro grande la accion motriz, y en la sustitucion del émbolo de dicha bomba por un alambre ó una cuerda. Introdúcese ésta, por vía de traccion, en el cuerpo de prensa; trasmite al líquido incompresible contenido en este la presion necesaria para dicha introduccion, y esta presion misma resulta multiplicada, como

en la prensa hidráulica comun, en razon de las superficies de seccion del émbolo mayor y de la cuerda.

El cuerpo de prensa (fig. 190) contiene un carrete movido por fuera con un manubrio, y en

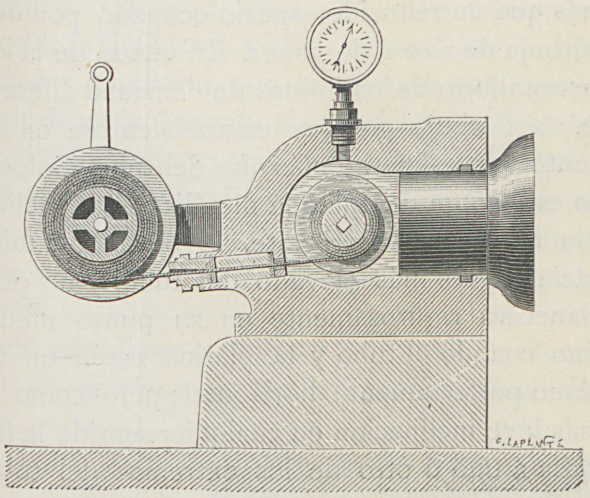


Fig. 190.—Prensa esterhidráulica de Desgoffe y Ollivier

el que se va enrollando una cuerda ó alambre que se desenrolla de otro carrete, con lo cual la cuerda se introduce poco á poco en el líquido que hay en el cuerpo de bomba. Este líquido (por lo regular es aceite) resulta así desalojado, y la presion que para ello debe sufrir se trasmite por igual á cada elemento de la superficie de seccion del émbolo, igual á la seccion de la cuerda misma.

Esta innovacion ideada por los Sres. Desgoffe y Ollivier tiene dos ventajas: se aumenta de un modo notable la fuerza comprimente, puesto que se puede dar á la cuerda un diámetro mucho menor que el del émbolo de la bomba de inyeccion, á causa de las deformaciones que una varilla de metal rígido experimentaria si sus dimensiones fuesen muy reducidas; y además, como la introduccion de la cuerda en la prensa *esterhidráulica* se efectúa enrollándola en bobinas interiores y exteriores al cilindro del cuerpo de prensa, el movimiento es continuo, al paso que en la prensa comun es por golpes sucesivos. Mas junto á estas ventajas tiene sus inconvenientes, que M. Tresca resume del modo siguiente en el dictámen, que no por esto deja de ser favorable, que este distinguido ingeniero ha dado de la prensa esterhidráulica á la *Sociedad de fomento de la industria nacional:*

«Para acomodar el carrete interior es menester dar al cuerpo de prensa mayor capacidad; para poder trasmitir el movimiento, hay que abrir un orificio destinado al paso del árbol y proveerlo de una caja de estopa bien ajustada; lo propio sucede respecto del orificio de introduccion de la cuerda, por el cual no debe salir la menor gota de líquido, so pena de dejar vacía la prensa y de ocasionar, miéntras esta funciona, grandes disminuciones de presion.»

Segun M. Tresca, el uso de esta nueva prensa será ventajoso en la mecánica que no requiera grandes presiones, pero en los trabajos de consideracion se tropezará con sérias dificultades.

II

NIVEL DE AGUA.—NIVEL DE AIRE

Las superficies libres de un mismo líquido en los vasos comunicantes se hallan en un mismo plano horizontal, tan luégo como se restablece el equilibrio. Hase utilizado esta propiedad fundamental de los líquidos para construir un instrumento muy sencillo del cual se sirven los geómetras en sus operaciones de nivelacion. Dicho instrumento, llamado *nivel de agua* (fig. 191), se compone de un largo tubo metálico *bb*, acodado por sus extremos, á los que se adaptan verticalmente dos tubos de vidrio *e f*, abiertos en su parte superior. Para operar

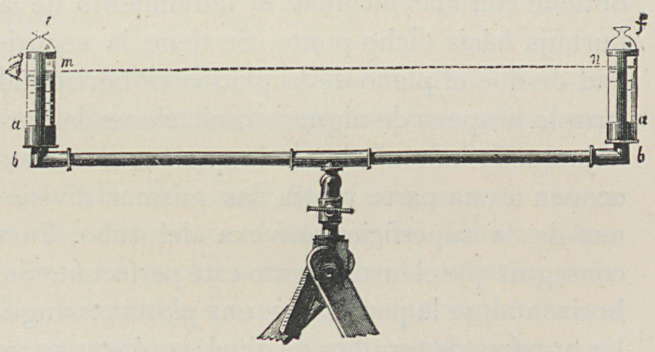


Fig. 191.—Nivel de agua

con él, se llena de agua el tubo horizontal, de modo que el líquido suba hasta las tres cuartas partes de los tubos laterales. Si estando entónces el tubo colocado casi horizontalmente, se dirige una visual á las dos superficies de agua de los tubos de vidrio, por una línea tangente interior *mn*, la visual será seguramente horizontal. Haciendo girar el instrumento sobre su eje en otra direccion, la nueva visual será tambien

horizontal y estará situada en el mismo plano que la primera, con tal que los diámetros de los tubos de vidrio sean rigurosamente los mismos. De este modo se pueden determinar los puntos de un mismo nivel sobre el terreno, y por medio de una serie de operaciones cuya descripcion no es de este lugar, obtener las diferentes altitudes del suelo.

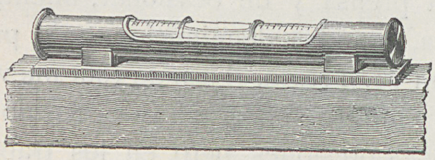


Fig. 192.—Nivel de aire

Los *niveles de aire* son instrumentos que sirven para el mismo objeto; pero su construccion está basada en distinto principio de física.

Consisten en un tubo de vidrio cerrado por todas partes, y metido en un estuche de metal que deja ver una parte del tubo (fig. 192). Este tubo está enteramente lleno de un líquido, como agua, alcohol ó éter (estos dos últimos son preferibles al agua porque no se congelan), sin dejar más que un reducido espacio ocupado por una burbuja de aire ó de vapor. En virtud de la ley de equilibrio de los flúidos de densidad diferente, la burbuja gaseosa estará siempre en el punto verticalmente más alto del tubo. Colocado este sobre una platina metálica, si se inclina con respecto al horizonte, la burbuja subirá hácia el lado más elevado del tubo, y no permanecerá rigurosamente en su punto medio sino cuando el tubo y la platina estén en un plano perfectamente horizontal; pero como la más leve inclinacion en cualquier sentido la llevaria á uno ú otro de los extremos del tubo,

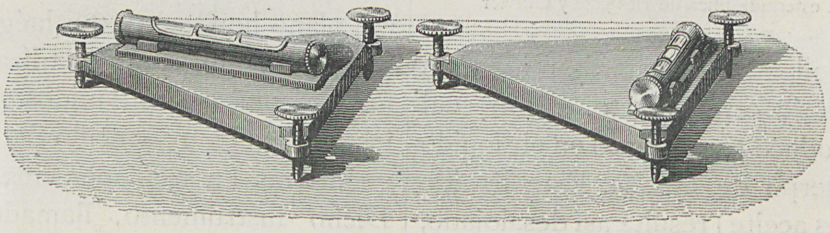


Fig. 193.—Horizontalidad de un plano obtenida con un nivel de aire

para obviar este inconveniente el tubo es ligeramente convexo en su parte superior, y se obtiene con más facilidad el movimiento de la burbuja hácia dicho punto. Se tiene la seguridad de que el plano de la platina es horizontal cuando despues de algunas oscilaciones la burbuja queda inmóvil de modo que sus extremos ocupen á una parte y otra las mismas divisiones de la superficie convexa del tubo. Para conseguir que el instrumento esté perfectamente horizontal, se le pone sobre una platina triangular provista de tornillos de nivel; entónces se coloca el aparato paralelamente á una de las bases del triángulo, y moviendo de un modo conveniente uno de los dos tornillos de esta base se obtiene la primera línea horizontal. Pónese en seguida el nivel en direccion del vértice del triángulo, y se hace uso del tercer tornillo para tener la horizontalidad de esta segunda línea. El plano de la superficie es entónces necesariamente horizontal, puesto que pasa por dos líneas que lo son á su vez (fig. 193).

El nivel de aire da resultados más exactos que el de agua; por lo cual se le emplea con preferencia en las operaciones de geodesia y hasta en los trabajos de nivelacion de cierta importancia. Todos los instrumentos de precision, algunas de cuyas partes deben conservar durante las observaciones una direccion horizontal ó vertical rigorosa, están provistos de un nivel de aire, y sobre todo la mayor parte de los instrumentos de geodesia y de astronomía.

III

POZOS ARTESIANOS.—SURTIDORES

La construccion de los pozos artesianos está basada tambien en el principio de la igualdad de altura de los líquidos en los vasos comunicantes; pero además de esta condicion es indispensable conocer geológicamente las capas de terreno y las de agua subyacentes. Aquí nos limitaremos, en lo que tenemos que decir acerca de esta importante aplicacion de las ciencias, á

lo que concierne al capítulo correspondiente de la física.

Ante todo ¿qué es un *pozo artesiano*? ¿Conocieron los antiguos estos pozos? Lo mejor que en nuestro concepto podemos hacer para responder á estas dos preguntas, es tomar de Francisco Arago los párrafos en que, despues de dar la definicion pedida, resume con la claridad y precision que le son propias, cuanto históricamente se sabe acerca del primer punto:

«Perforando verticalmente el suelo hasta suficientes profundidades, se encuentran en ciertas localidades, capas de agua subterráneas que suben á la superficie por el canal que la sonda les ha abierto; estas aguas forman á menudo surtidores copiosos y muy altos. Las fuentes de surtidor perforadas por la mano del hombre, y hasta los simples pozos de escaso diámetro alimentados por aguas que llegan de gran profundidad, reciben el nombre de *fuentes artesianas*, *pozos artesianos*, *pozos perforados*, etcétera.

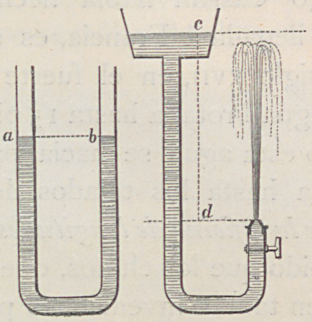
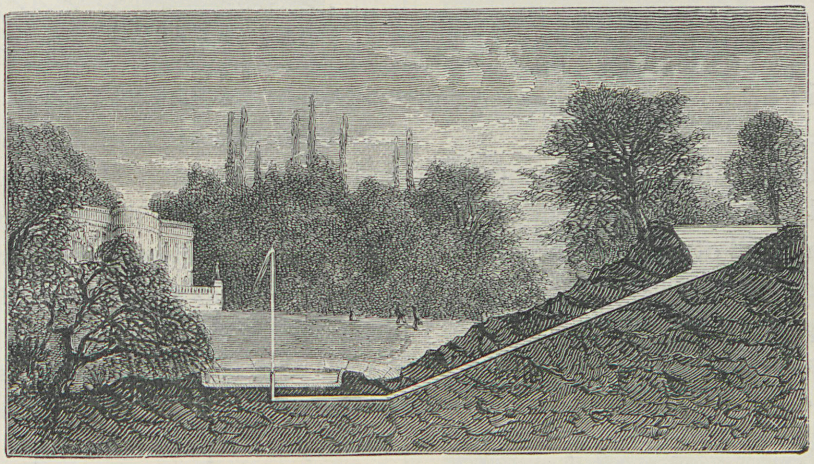


Fig. 194.—Principio de los surtidores y de los pozos artesianos

»Los pozos *artesianos* se llaman así del nombre de una provincia de Francia, el Artois, donde segun parece se dedicaban sus habitantes más especialmente á buscar aguas subterráneas. Hay sin embargo que confesar que los antiguos conocieron perfectamente esta clase de pozos y que sabian abrirlos.


Fig. 195.—Surtidor

»Olimpiodoro, que escribia en Alejandría á mediados del siglo VI, cuenta que en el Oasis se habian abierto pozos á 200, 300 y á veces hasta á 500 anas de profundidad, y que estos pozos lanzában por sus bocas rios de agua de la cual se aprovechaban los labradores para regar sus campiñas.

»En ciertos puntos de Italia estaban tambien probablemente en uso los pozos artesianos. El más antiguo que se conoce en Francia data, segun se dice, del año 1126; está en Lillers (Artois), en el antiguo convento de Cartujos.

»Los habitantes del desierto de Sahara conocen hace mucho tiempo los pozos artesianos, á juzgar por lo que se lee en los *Viajes de Shaw*: «El *Wad-reag* es un conjunto de aldeas »situadas bastante al interior del Sahara: estas »aldeas no tienen manantiales ni fuentes; pero »los habitantes se proporcionan agua de un »modo muy singular. Abren pozos á cien y á »veces á doscientas brazas de profundidad, y »nunca dejan de encontrar agua en abundancia. »Con este objeto extraen varias capas de arena »y casquijo, hasta que dan con una piedra que »parece pizarra, y que está precisamente, segun »se sabe, sobre lo que ellos llaman *Bahar tâht* »*el Erd* ó *mar debajo de tierra*, nombre que dan »al abismo en general. Esta piedra se horada »con facilidad, y en seguida sale el agua tan »bruscamente y con tal abundancia, que á ve-

»ces sorprende y sofoca (ahoga?) á los que han »bajado para dicha operacion, por más que se »les saque con toda la rapidez posible.»

»Domingo Cassini habia hecho construir ántes de su llegada á Francia, es decir, á mediados del siglo XVII, en el fuerte Urbain, un pozo cuya agua brotaba hasta 15 piés de altura. Aun cuando esta agua se hacia pasar por un tubo, llegaba hasta los tejados de las casas.» (*Anuario de la Oficina de longitudes para* 1835.)

Se ha creido que los chinos, que se nos han anticipado en tantas invenciones prácticas, conocian los pozos artesianos hace millares de años. Abrian efectivamente pozos de considerable profundidad para sacar agua salada; pero nada prueba que esta agua brotase á la superficie del suelo como la de los verdaderos pozos artesianos.

Tales son los principales datos históricos sobre esta aplicacion notable del principio de los vasos comunicantes. Veamos ahora cómo explica la teoría este fenómeno:

Si se coge un tubo de dos brazos encorvados en forma de U, el agua que se eche en uno de los brazos penetra en el otro, y tan luégo como se establece el equilibrio, el nivel del agua está á igual altura (fig. 194) en *a* y en *b* en uno y otro. Supongamos ahora que uno de los brazos es más corto que el otro y que está préviamente cerrado con una llave ó espita, y que el brazo más largo remata en un depósito lleno de agua. Si el nivel *c* del agua en este excede en *cd* de la altura del nivel del brazo menor, el líquido ejercerá sobre el fondo una presion equivalente al peso de una columna de agua de altura *cd*; de suerte que si abriendo la llave se deja que esta presion se ejerza libremente, hará brotar el líquido á una altura que seria igual á *cd*, si no mediara la resistencia que opone á su movimiento el roce contra las paredes del tubo, y la de la masa de agua desalojada por el chorro. En todo esto suponemos que el depósito es de tal capacidad (si no está alimentado por un manantial constante), que su mismo nivel no varía de un modo perceptible en el experimento.

Vese pues que basándose en la propiedad del equilibrio de los líquidos en los vasos comunicantes, es fácil explicar los surtidores artificiales (fig. 195) que adornan los parques, jardines, plazas públicas, etc.

Así pues, un pozo artesiano no es otra cosa sino un agujero de sonda abierto al través de las capas superiores del suelo; y que, á profundidades variables segun los terrenos, va á encontrar una capa de agua subterránea aprisionada entre capas de rocas impermeables. Esas sábanas líquidas siguen las sinuosidades é inclinaciones de las capas de terrenos; por consiguiente, para que el agua suba por el pozo, basta que entre el punto á donde ha llegado la sonda y el nivel de la sábana líquida á cualquier distancia haya cierta diferencia de altura. Tenemos un ejemplo de este caso en el corte geológico de los terrenos que constituyen el

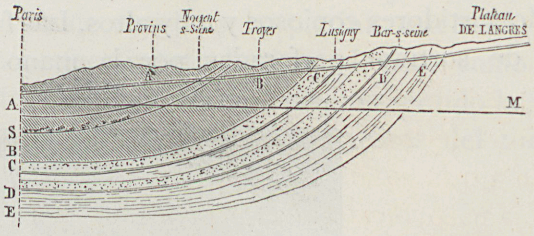


Fig. 196. — Corte geológico de la cuenca del Sena entre Paris y Langres

suelo parisiense, desde Paris hasta el nivel superior de la cuenca, en la meseta de Langres (fig. 196). Las capas de arena acuífera que se han encontrado á 548 y 570 metros de profundidad al perforar los pozos artesianos de Grenelle y de Passy, tienen sobre sí una serie de rocas y en especial una capa de creta de considerable espesor. Todos estos lechos de terrenos, al levantarse progresivamente, van á terminar en puntos tanto más remotos cuanto mayor es su profundidad relativa. La arena acuífera no asoma hasta llegar á la meseta de Langres. En toda la extension de la cuenca donde aparece dicha arena recibe esta las aguas pluviales que filtran y descienden hasta lo más profundo de ella, constituyendo así como una sucesion de inmensos tubos acodados en los que la sábana líquida está cada vez más comprimida. Compréndese por lo tanto que al abrir un pozo en un punto cuya altitud es inferior á la de la meseta en donde asoma la capa de arena, el agua subirá por el pozo y brotará por cima del suelo tan luégo como la profundidad de la perforacion sea bastante grande para llegar á la capa de agua en cuestion.

Así pues la teoría de los pozos artesianos, tal como acabamos de explicarla, se basa en la

existencia de capas de agua subterráneas, de lagos ó más bien de corrientes aprisionadas en las profundidades de los estratos terrestres. Esas sábanas de agua están á veces en capas permeables, formadas de arenas más ó ménos disgregadas, y tambien de rocas calizas acribilladas de vacíos ó hendiduras, pero comprendidas entre otras capas impermeables, como por ejemplo bancos de arcilla. Estos rios subterráneos se alimentan merced á las aguas pluviales que caen en las regiones en que asoman las capas permeables y que penetran en estas. Y precisamente la diferencia de nivel que existe entre los puntos de partida de la corriente líquida y el del punto más bajo por donde esta circula subterráneamente y en donde la ha encontrado el agujero de sonda, es la que produce la enorme presion capaz de hacer subir el agua hasta el nivel del suelo, y áun de obligarla á brotar á gran altura.

Llámase *nivel hidrostático* de un pozo perforado, la altura fija á que llega el agua cuando se prolonga por cima del suelo el tubo que tiene por objeto, despues de haber servido para la perforacion, impedir que se pierdan las aguas al través de las capas más ó ménos permeables que encuentran en su ascension. Háse visto que este nivel no es invariable, y que sube ó baja segun que aumente ó disminuya el caudal de las corrientes de la region de orígen. Esta coincidencia es una prueba irrefutable de la procedencia de las aguas subterráneas, por cuanto su abundancia está en relacion con la de las lluvias.

Los procedimientos de perforacion, hoy dia muy perfeccionados, no dejan de ofrecer sérias dificultades, cuando los pozos artesianos tienen una profundidad tan grande como los de la cuenca parisiense que acabamos de citar. Si los trépanos, los cazos y sus varillas (que son las herramientas que sirven para perforar las rocas y sacar los escombros á la superficie del suelo) llegan á romperse, hay que practicar para sacarlos ciertas operaciones que pueden ser largas y costosas.

Muchas ciudades más ó ménos ricas ó populosas no han vacilado en hacer sacrificios considerables para abrir pozos artesianos y proporcionarse así agua abundante y pura á la vez. Pero en los países en que falta el agua, en que la lluvia se desconoce por decirlo así, y en que sus escasos rios están constantemente secos, es donde los pozos artesianos son de utilidad inmensa. Ya hemos dicho ántes que los antiguos egipcios se valian de ellos, ó más bien los

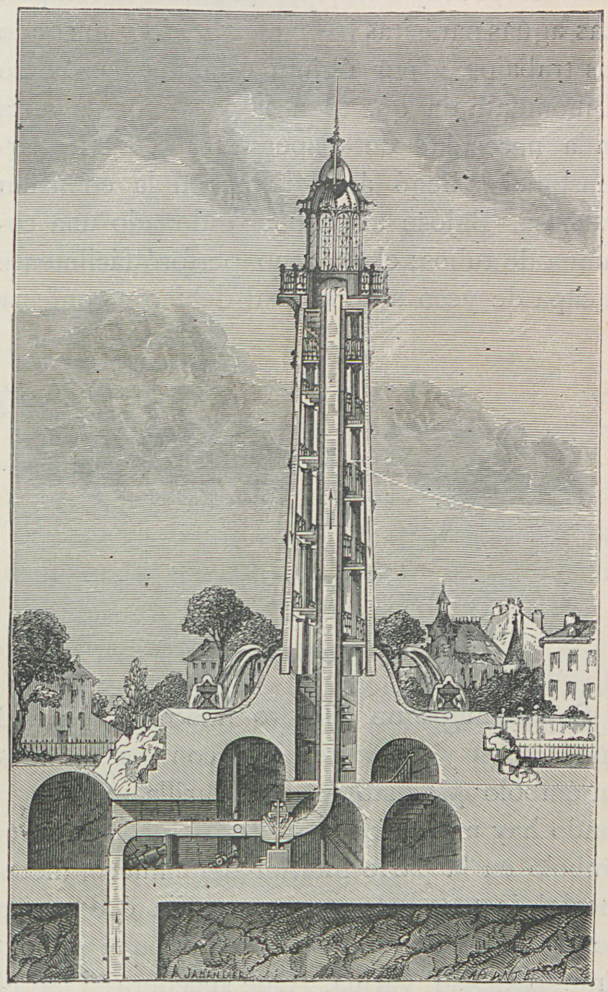


Fig. 197.—Pozo artesiano de Paris

habitantes de los oasis de los desiertos de Libia. Por iniciativa del gobierno francés se han abierto al sur de Argelia numerosos pozos, empleando al efecto procedimientos perfeccionados de sondeo y gracias á la escasa profundidad á que se encuentran en el desierto las capas de agua subterráneas. Citemos uno ó dos ejemplos de los fecundos resultados que los trabajos artesianos han producido ya en el Sahara.

El primer pozo artesiano se abrió en Tamerna, en el Ued R'ir, bajo la direccion y por iniciativa del general Desvaux. A las seis semanas de trabajo, la sonda llegó á una capa de agua, cuyo caudal de 4,000 litros por minuto dió orígen á un verdadero rio.

Otro ejemplo: el oasis de Sidi-Rached, á 26 kilómetros al norte de Tuggurt, estaba amena-

zado de inminente ruina; la mitad de sus palmeras habia muerto, la invasion de la arena era mayor de dia en dia, y los habitantes habian intentado abrir pozos; mas á los 40 metros de profundidad habian tropezado con un banco de yeso térreo muy duro, que no pudieron romper. Las aguas parásitas habian invadido y anegado sus trabajos, y por último estaba ya próximo el momento en que toda la poblacion se veria en la necesidad de dispersarse. En tales circunstancias llegó á Sidi-Rached la comision francesa. Bajóse al pozo abandonado una columna de tubos; el trépano perforó fácilmente la capa de yeso ante la cual debieron confesar los indígenas su impotencia, y á los cuatro dias de trabajo, salia de las entrañas de la tierra como rio bienhechor una capa de agua de 4,500 litros por minuto.

A los cinco años de análogos trabajos, se habian perforado cincuenta pozos, que daban cerca de 40,000 litros de agua por minuto, 57 millones de litros diarios, sin que los gastos hubiesen excedido en totalidad de 300,000 francos. Los resultados fueron más de 30,000 palmeras plantadas, numerosos oasis levantados de sus ruinas, y dos nuevas poblaciones creadas en el desierto. Todavía se prosigue hoy con éxito esta obra civilizadora.

CAPÍTULO IV

LAS BOMBAS

I

TEORÍA DE LAS BOMBAS

Supongamos un cilindro hueco en el cual pueda subir y bajar rozando con sus paredes un émbolo provisto de una varilla y en cuyo fondo hay un orificio (fig. 198). Hallándose el émbolo en la parte inferior del cilindro, metamos el instrumento en una vasija ó depósito lleno de agua; y en seguida subamos el émbolo tirando de su varilla. ¿Qué sucederá? Que el espacio vacío de aire, que el émbolo deja debajo de sí en su marcha ascendente, se llenará de agua, primero hasta que el nivel del líquido sea en el cilindro el mismo que en el depósito, lo cual sucederá en virtud del principio del equilibrio de los líquidos en los vasos comunicantes, áun cuando hubiese aire debajo del émbolo. Pero el agua continúa subiendo por cima de ese nivel, siguiendo instantáneamente al émbolo cuya seccion inferior toca sin cesar; fácilmente se comprende que su movimiento tiene por causa la presion que el aire exterior ejerce en la superficie líquida del depósito.

Supongamos que el cilindro tiene más de 10^{m},33 de elevacion, y que el depósito contiene suficiente cantidad de agua; la columna líquida aumentará en altura hasta llegar poco más ó ménos á los mismos 10 ,33. En este momento su peso equilibra la presion atmosférica: si el émbolo sigue subiendo, el agua se detendrá. Este es precisamente el obstáculo con que tropezaron los fontaneros de Florencia y que hizo creer á los físicos de la corte del gran duque que la naturaleza cesaba de tener *horror al vacío* más allá de 32 piés.

Tal es en principio la bomba á que se da el nombre de *bomba aspirante*, porque el émbolo parece aspirar el líquido á medida que sube. Veamos ahora cómo está construido el aparato para llenar el objeto al cual se le destina, es decir, para suministrar agua luégo que esta se ha elevado á cierta altura sobre el nivel del depósito.

El cilindro ó *cuerpo de bomba* está provisto de un tubo cilíndrico de diámetro menor, cuyo extremo inferior penetra en el depósito. Al orificio de separacion va adaptada una válvula que se abre y cierra en el mismo sentido que la primera (fig. 199). Ahora se comprenderá ya lo que debe suceder cuando se imprime al émbolo un movimiento alternado en el cuerpo de bomba. Al subir por primera vez se hace debajo de él vacío. El aire del tubo de aspiracion levanta la válvula por efecto de su presion, y el agua sube hasta cierta altura. Cuando el émbolo baja, comprime el aire que se ha introducido en el cuerpo de bomba; por una parte, su presion cierra la válvula inferior, y por otra,

levanta las del émbolo y el gas se escapa al exterior. A cada movimiento análogo el agua se eleva más y más, y acaba por ponerse en contacto con la parte inferior del émbolo y por pasar sobre su cara superior: la bomba está ya alimentada. Entónces es fácil ver cómo debe salir el agua al exterior por un orificio lateral practicado en la parte superior del cuerpo de bomba. Por otra parte, tan luego como la bomba está alimentada, y el piston sube, se hace debajo de él el vacío, y el agua no cesa de agolparse contra su cara inferior. La válvula del tubo de aspiracion permanece ya constan-

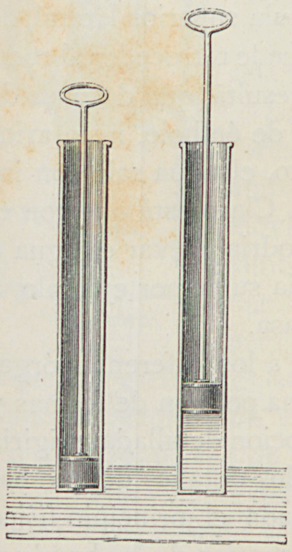


Fig. 198. — Principio de la bomba aspirante

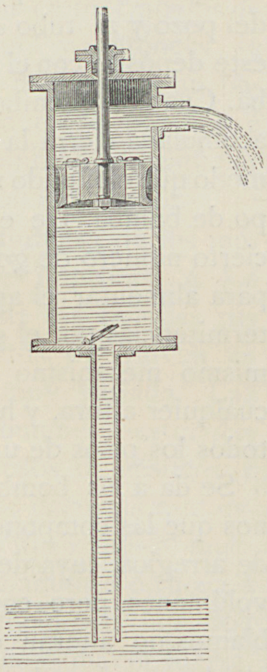


Fig. 199. — Bomba aspirante

temente abierta, y el movimiento de abajo arriba del émbolo es el que hace subir el líquido.

Es fácil calcular los esfuerzos que se requieren para subir ó bajar el émbolo cuando la bomba está alimentada. Si el émbolo baja, sus propias válvulas se abren; las presiones trasmitidas á sus dos caras por el líquido son iguales por una y otra parte, y las únicas resistencias que se experimentan proceden de los rozamientos del líquido y del émbolo. Pero cuando se levanta, la presion atmosférica es la única que se anula, por cuanto se ejerce sobre el depósito por una parte, y sobre el nivel superior del líquido por otra, y el esfuerzo que se ha de hacer se calcula teniendo en cuenta el peso de una columna de agua cuya base sea la superficie del émbolo y su altura la distancia vertical de los dos niveles del líquido. Si esta distancia es, por ejemplo, de 2 metros, y la

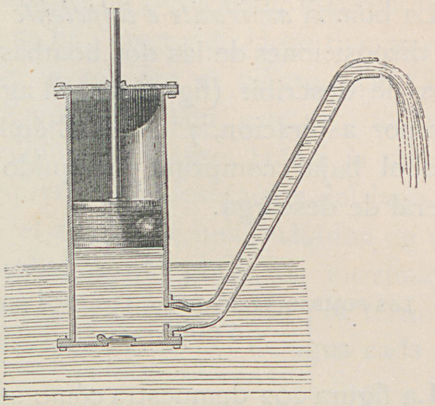


Fig. 200. — Bomba impelente

base del émbolo tiene un decímetro cuadrado, se necesitaria una fuerza de 10 kilógramos para levantar el émbolo, sin contar las resistencias ocasionadas por el rozamiento.

La experiencia demuestra que no se puede dar á la bomba aspirante una profundidad ó altura que exceda de 7 á 8 metros, en vez de los $10^{m},33$ que indica la teoría. La razon de esta imperfeccion consiste en los escapes de aire y de agua que siempre existen entre el cuerpo de bomba y el émbolo; aparte de esto, el agua del depósito contiene casi siempre aire en disolucion y este aire se desprende del líquido, porque la superficie de éste se halla en contacto con un espacio en que la presion es muy débil.

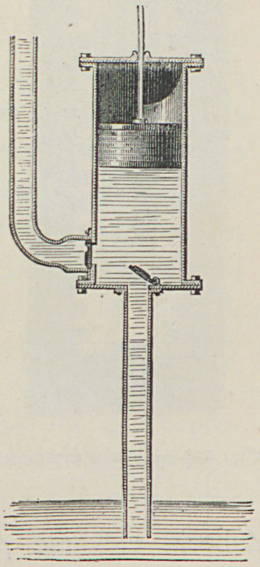


Fig. 201. — Bomba aspirante é impelente

En la *bomba impelente*, el cuerpo de bomba penetra en el agua, de suerte que el líquido se introduce en él por simple comunicacion (fig. 200).

Además, el émbolo es macizo, y el tubo que sirve para elevar el agua arranca de la parte inferior del cuerpo de bomba, estando provisto en el orificio de separacion de una válvula que se abre de fuera á dentro. En este

caso el émbolo, en su marcha descendente, comprime el agua, cuya presion cierra la válvula del cuerpo de bomba, abre por el contrario la del tubo de ascension y hace salir el líquido al exterior.

La bomba *aspirante é impelente* participa de las disposiciones de las dos bombas que acabamos de describir (fig. 201). El agua sube en ella por aspiracion, y como el émbolo es macizo, al bajar comprime el líquido en el tubo lateral de descarga.

II

LAS BOMBAS APLICADAS Á LOS USOS DOMÉSTICOS Ó INDUSTRIALES

La figura 202 demuestra cómo se instala por lo regular una bomba aspirante sobre un pozo cuando la profundidad del pozo está á siete ú ocho metros debajo del punto á donde el agua debe subir. Teóricamente hablando, el agua

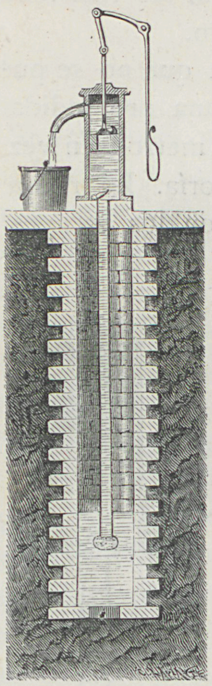


Fig. 202. — Bomba aspirante

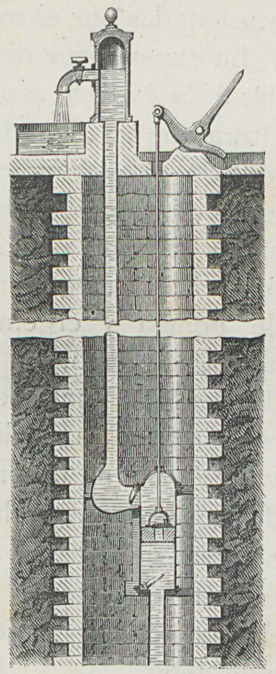


Fig. 203. — Bomba aspirante é impelente, llamada *elevadora*

deberia elevarse por el tubo de aspiracion á $10^{m},33$ de altura cuando la presion barométrica es de 760 milímetros; pero en realidad la ascension es mucho menor, porque segun hemos demostrado en el párrafo anterior, el mecanismo no podria funcionar con la perfeccion que se requiere.

Si la profundidad del pozo pasa de siete ú ocho metros, la bomba aspirante no basta, y se la completa con un mecanismo merced al cual puede impeler el agua á mayor altura y llevarla desde el punto á que llega por aspiracion hasta aquel en que se la debe utilizar.

La bomba se convierte entonces en una *bomba aspirante y elevadora*, ó mejor dicho, aspirante é impelente. La figura 203 presenta el modelo generalmente adoptado para los pozos profundos. Consiste sencillamente en una bomba aspirante cuyo cuerpo cilíndrico penetra en el interior del pozo á suficiente profundidad para que el agua llegue á él por aspiracion. A cada movimiento ascendente del émbolo va el líquido á parar á un depósito instalado en el interior del pozo y al tubo que pone en comunicacion este depósito con el cuerpo exterior de la bomba. Cuando el émbolo baja, el peso del agua acumulada cierra la válvula superior lateral, de modo que el líquido no puede retroceder al cuerpo de bomba. De esto resulta que despues de cierto número de golpes de émbolo, necesarios para alimentar el aparato, el agua sale con intermitencias por el grifo. Claro está que con el mismo mecanismo se podria elevar el agua á cualquier altura, y hacerla subir por ejemplo, á todos los pisos de una casa.

Se da á las bombas y á los diferentes órganos que las componen una porcion de formas y de arreglos, cuya descripcion detallada exigiria volúmenes, pero como los detalles de que hablamos no alteran en nada el principio físico en el que se basa la construccion de las bombas, careceria aquí de interés. Tan pronto obedecen estas modificaciones al destino particular que se desea dar á las bombas como á la disposicion con que el inventor ha creido oportuno construir el aparato para obviar un inconveniente ó conseguir esta ó la otra ventaja.

A veces se construyen bombas aspirantes é impelentes de doble efecto con objeto de evitar la intermitencia del chorro. Están hechas de suerte que la aspiracion y el empuje del agua se efectúan á la vez, y tanto al subir como al bajar el émbolo. El de estos aparatos es macizo, y el cuerpo de bomba tiene cuatro orificios provistos de válvulas, como se ve en la figura 204. Durante el movimiento ascendente del émbolo, se abre la válvula A, y se introduce por aspiracion cierta cantidad de agua en la parte inferior V del cuerpo de bomba; la que contiene ya el

tubo de salida C' cierra la válvula B; por el contrario, la válvula A' se abre dando paso al agua contenida en V debajo del émbolo, la cual va á parar á C'; y por último, la presion de esta agua cierra la válvula B'. Al bajar el émbolo, todo ocurre de distinto modo; las válvulas A y A' se cierran, B y B' se abren, de suerte que el agua es aspirada por arriba y expulsada por abajo. Por consiguiente, el chorro es casi continuo, pero fácilmente se comprende que la palanca, balancin ó manubrio necesita doble esfuerzo. Empléase especialmente esta clase de bombas en los trabajos de desecacion, y entónces se adapta á la máquina un balancin manejado por dos ó varios hombres, y hasta por una máquina de vapor.

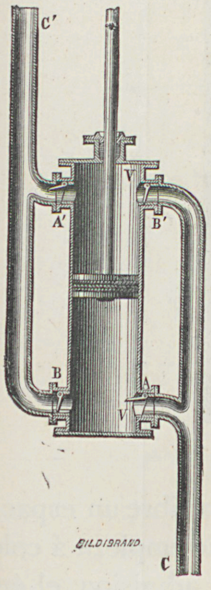


Fig. 204.—Bomba de doble efecto

La naturaleza de los motores que imprimen á los émbolos de las bombas sus movimientos de vaiven es tambien muy variada. Las bombas comunes, destinadas para los usos domésticos y pequeñas están provistas de palancas que oscilan alrededor de un punto fijo y que se mueven á brazo, ó bien de un manubrio ó rueda á la que se da vueltas del mismo modo (figs. 207 y 208). Pero cuando se requiere mayor fuerza, se emplea como motor un caballo que da vueltas á un malacate, ó bien el vapor, ó bien un salto de agua. La máquina elevadora del puente de Nuestra Señora en Paris, que ha desaparecido hace algunos años, era una bomba movida por ruedas hidráulicas situadas en un punto del Sena en que la rapidez de la corriente suministraba una fuerza considerable. Lo propio sucedia con la antigua máquina de Marly, que elevaba las aguas del Sena hasta los sitios reales de Marly y de Versailles por medio de 14 ruedas hidráulicas que ponian 221 bombas en movimiento. Hoy cinco solas ruedas cada una de las cuales mueve cinco bombas horizontales, suministran una cantidad de agua mucho mayor que la de la antigua máquina, lo cual puede dar idea de los perfeccionamientos introducidos de dos siglos á esta parte en las construcciones mecánicas. Las bombas de Chaillot están movidas por vapor: tambien es una máquina de vapor, instalada á unos cien metros de la orilla del Sena, la que pone en movimiento las bombas que proveen de agua á Fontainebleau. Los inmensos trabajos de desecacion emprendidos en Holanda se han efectuado largo tiempo con bombas cuyo motor era el viento. En 1840 todavía se empleaban con este objeto más de 2,500 molinos de viento. Hácia la misma época se emprendió la desecacion del lago de Harlem con el auxilio de una máquina de vapor de 350 caballos que ponia en movimiento 11 bombas, las cuales extraian por término medio 475,000 metros cúbicos de agua cada 24 horas.

Los diferentes órganos de las bombas empleadas en las grandes obras hidráulicas deben estar construidos con gran solidez á causa de las presiones y resistencias considerables que han de soportar. En este caso el émbolo suele ser un cilindro metálico macizo como lo representa la fig. 209, y se le da el nombre de *émbolo buzo*.

El mecanismo que sirve para producir la aspiracion del agua en las bombas aspirantes no es siempre un émbolo que sube y baja en un cuerpo cilíndrico y hace el vacío hácia el lado del tubo por donde sube el líquido. En ciertas bombas llamadas *oscilantes*, es una pieza fija que oscila alrededor de un eje haciendo las veces de émbolo, y que á la vez aspira haciendo el vacío por una de sus partes al paso que expele el agua atraida ya por el movimiento de la otra. La fig. 210 representa la seccion vertical de la bomba de Bramah, en la cual se ve fácilmente cuál es el juego de la pieza oscilante y de las válvulas.

En las bombas *rotatorias* (la fig. 211 reproduce el corte de la de Stoltz) los tubos de aspiracion C y de salida C' van á parar por dos orificios *a* y *a'* á un tambor circular A, en cuyo interior se mueve un anillo concéntrico al tambor B. Varias piezas *pppp* que se apoyan por una parte en el contorno interior del tambor y por otra en el de un excéntrico, cierran herméticamente el espacio anular, y por consiguiente hacen tras sí el vacío expulsando el agua y viniendo á ser otros tantos émbolos.

La bomba rotatoria sistema Behrens (figu-

ra 212), que funciona tambien como máquina de vapor (y de la cual nos ocuparemos al tratar de estas máquinas) tiene un mecanismo todavía más sencillo.

Un motor cualquiera, el vapor por ejemplo, pone en movimiento un árbol, que por un sistema de engranajes, hace mover en sentido contrario los ejes de dos émbolos C y C'. Estos

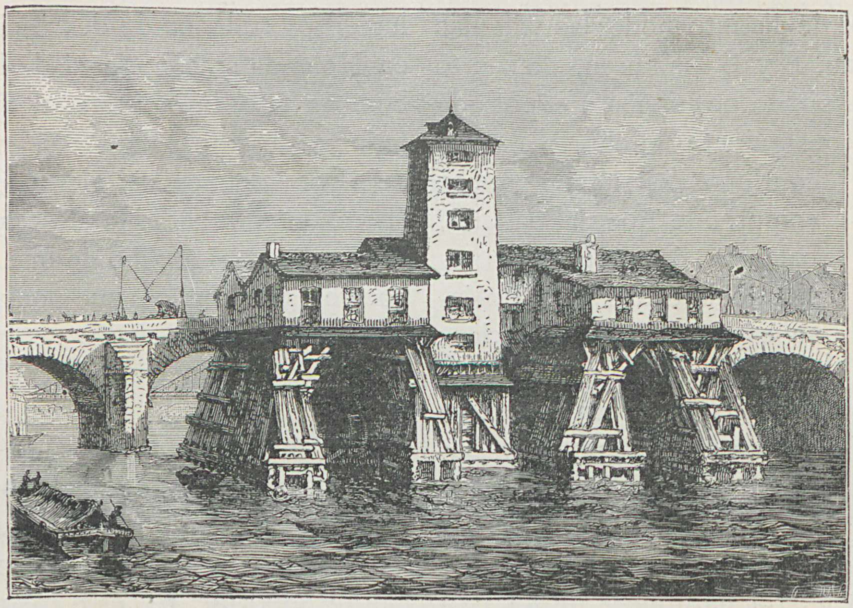


Fig. 205.—Antiguas bombas del puente de Nuestra Señora en Paris

giran en el interior de un tambor que comunica con el tubo B de aspiracion y con el tubo D de salida. Cada émbolo tiene la forma de una porcion de corona maciza que deja libre un espacio anular *aa'*. Cuando este espacio empieza á colocarse delante del orificio de admision, el ém-

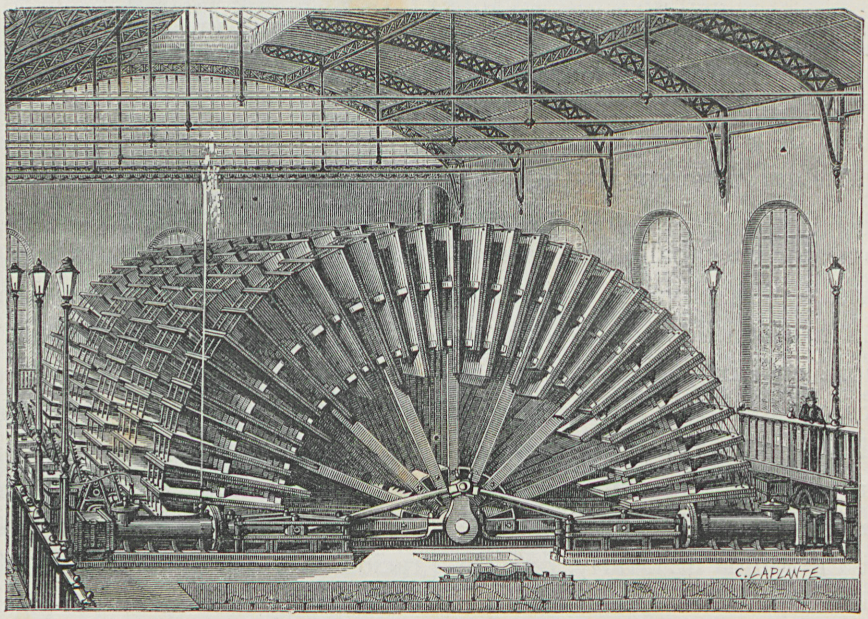


Fig. 206.—Nuevas ruedas hidráulicas y bombas de Marly

bolo, en virtud de su movimiento, va agrandando cada vez más tras sí la capacidad libre: hácese progresivamente el vacío y lo llena cierta cantidad de agua; miéntras tanto el otro émbolo impele por el orificio de salida el agua que se encontraba ya allí; á cada media vuelta los dos émbolos cambian sus funciones; el que aspiraba expele y recíprocamente, de suerte que la bomba es en cierto modo una bomba de doble efecto. Fácilmente se comprenderán las circunstancias de este doble efecto examinando lo que ocurre en una vuelta entera de rotacion

y comparando, por ejemplo, en la figura 212 las posiciones respectivas de los émbolos y de los espacios *aa'* despues de los intervalos sucesivos de cada cuarto de la rotacion total.

Réstanos decir unas cuantas palabras acerca de las bombas impelentes para completar lo relativo á este artículo, áun cuando, segun hemos dicho ántes, su construccion no esté en

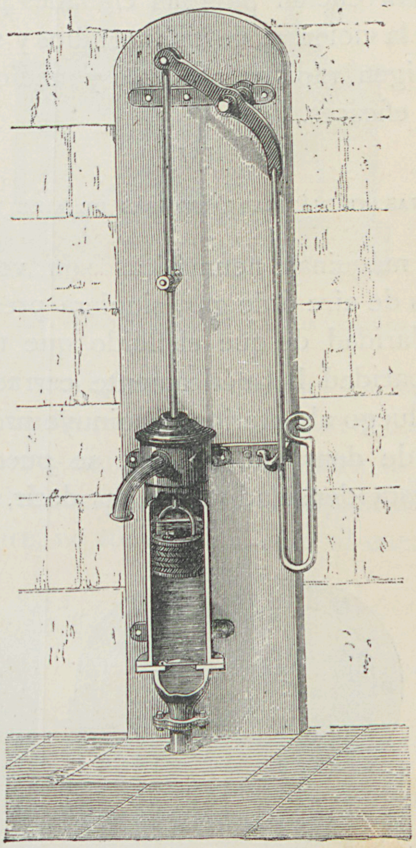


Fig. 207. — Bomba doméstica de balancin

modo alguno basada en el principio de la accion de la presion atmosférica.

III

BOMBAS CONTRA INCENDIOS

Las bombas contra incendios y las que se usan para el riego de jardines son bombas impelentes.

Las primeras (fig. 213) consisten por lo comun en dos bombas impelentes acopladas, fijas en el depósito de agua, el cual se llena con cubos y formando la cadena, ó bien con tubos adaptados á las bocas de riego que suele haber en las principales ciudades.

Se las maneja con un balancin, con el cual se articulan los vástagos ó bielas de dos émbolos. Estos se mueven en sentido contrario, es decir de un modo alternado, de suerte que el agua llega sin cesar á la capacidad en la que está metido el émbolo de salida. Esta capacidad contiene aire que, comprimido por el agua de la que

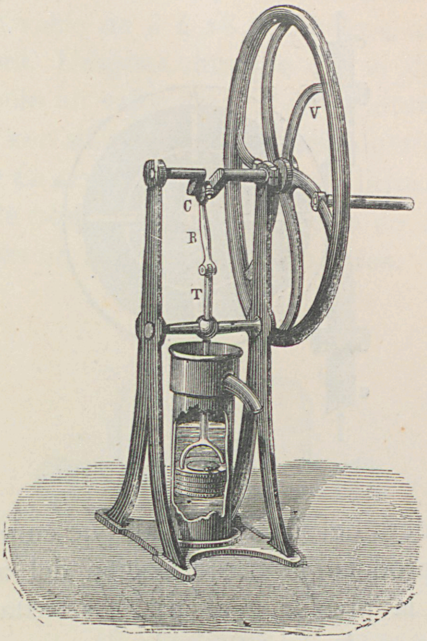


Fig. 208. — Bomba de rueda

se llena á cada momento, ejerce presion sobre el líquido, por cuya razon se la llama *depósito de aire.* La rapidez con que el agua sale por la manga de cuero depende pues de dicha presion,

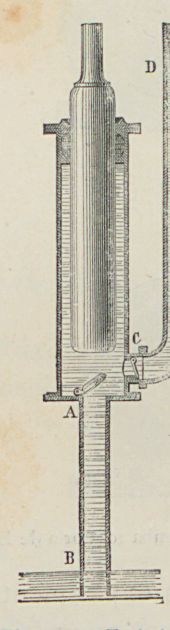


Fig. 209. — Embolo sumergible

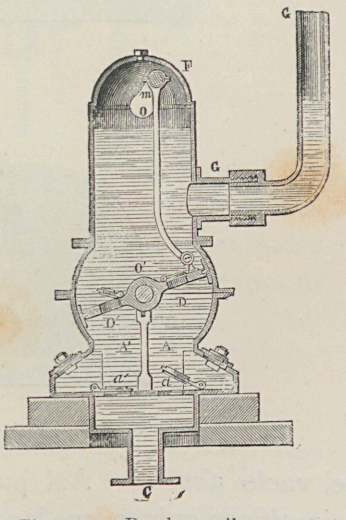


Fig. 210. — Bomba oscilante de Bramah (1)

y como esta varía poco si el depósito de aire es de suficiente capacidad, resulta que la velocidad del chorro es constante ó poco ménos.

(1) *Caa'*, tubo y válvulas de admision; AA', capacidades separadas por un tabique; DD', émbolo oscilante alrededor del eje O'; O*m'* manubrio que comunica el movimiento al émbolo.

De poco tiempo á esta parte se construyen bombas contra incendios movidas por vapor. La que representamos en la figura 214 lleva

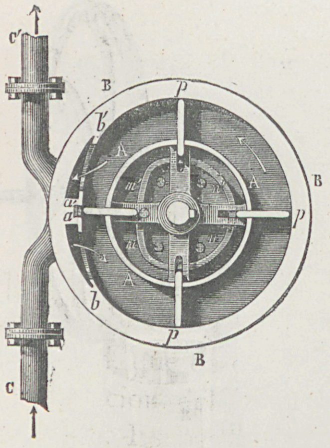


Fig. 211. — Bomba rotatoria de Stoltz

una caldera del sistema Field, que en ocho minutos produce la trasformacion del agua en vapor á la presion necesaria. Es bastante poderosa para dar 900 litros de agua por minuto y lanzar el chorro á 45 metros de altura.

Debemos citar tambien la bomba de vapor contra incendios construida por M. Thirion, la cual se compone de tres cuerpos de bomba reunidos en un mismo árbol, puesto en movimiento por las bielas de dos cilindros de vapor laterales. Con un orificio de 56 milímetros, despide un chorro que llega á 50 metros.

Compréndese cuán grande es la importancia de esta invencion para las ciudades populosas en que la violencia de los incendios y su extension exigen rápidos socorros y medios de extincion eficaces.

IV

MÁQUINAS NEUMÁTICAS Ó BOMBAS DE AIRE Y DE GAS

Las máquinas neumáticas son verdaderas bombas de aire ó de gas, siquiera presenten la particularidad de que el flúido que toman de una capacidad herméticamente cerrada, y que lanzan luégo al exterior, disminuye progresivamente de densidad, sin que se pueda hacer llegar esta densidad á cero, es decir, producir

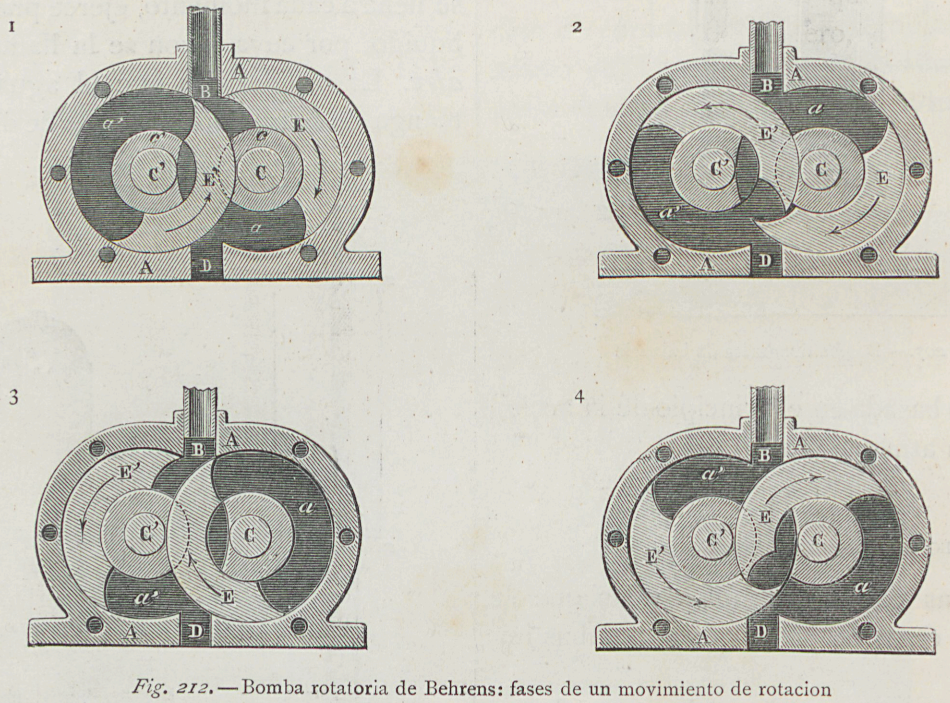


Fig. 212. — Bomba rotatoria de Behrens: fases de un movimiento de rotacion

el vacío absoluto. Así pues, los experimentos científicos exigen que las máquinas neumáticas estén construidas con gran perfeccion para que el vacío relativo logrado con ellas se acerque todo lo posible á este vacío ideal. Segun hemos visto al describir las bombas neumáticas perfeccionadas en la primera parte de este volúmen, se consigue en realidad con los aparatos más perfectos de esta clase reducir á 0,1 de milímetro la presion del gas ó del aire que queda en el recipiente al final de la operacion. Pero en las aplicaciones industriales no es necesario obtener un vacío tan perfecto; y en este caso es ventajoso servirse de una máquina neumática ménos perfecta, pero de más fuerza, como la inventada y construida por M. Deleuil, hábil fabricante de instrumentos de precision. Esta máquina, representada en su conjunto en

la fig. 216, y cuyo émbolo y cuerpo de bomba están trazados en mayor escala en la fig. 215, difiere de las máquinas comunes en un punto

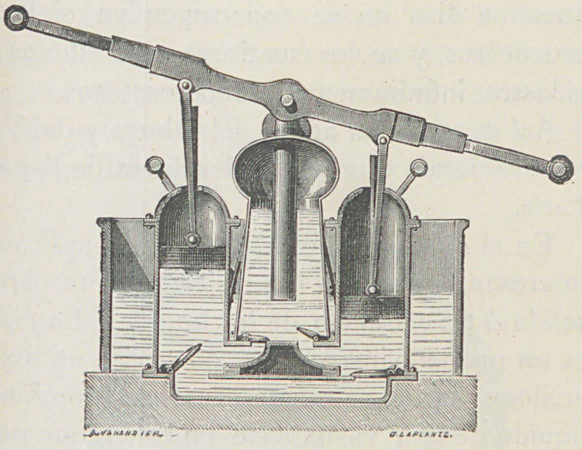


Fig. 213.—Bomba de balancin contra incendios

interesante y original. El émbolo, en lugar de estar lubrificado con aceite para que el contacto, tan perfecto como sea posible, entre su superficie y la del cuerpo de bomba impida todo escape de aire, no toca en realidad al cuerpo de

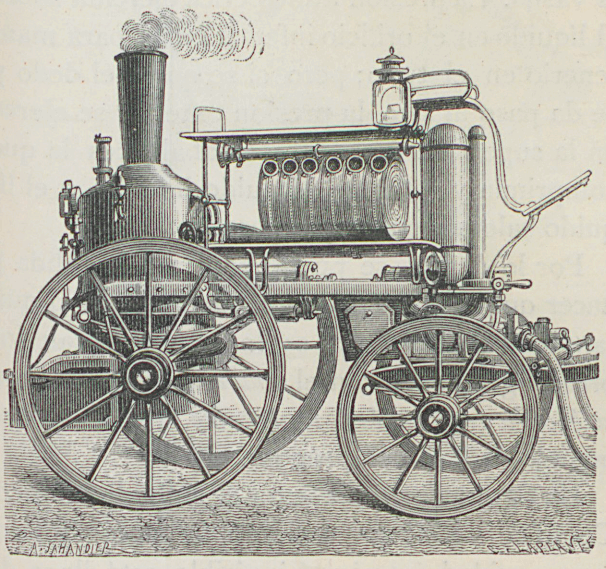


Fig. 214.—Bomba de vapor contra incendios

bomba, y está además surcado de estrías paralelas y equidistantes. El reducido intervalo $(0^{mm},02)$ que el constructor deja de este modo entre las dos superficies se llena de una tenue capa de aire. La experiencia demuestra que la adherencia de esta capa gaseosa á la superficie del émbolo es tal, que sustituye perfectamente al cuerpo graso de que suele estar untado el émbolo; en una palabra, que basta para interceptar toda comunicacion entre las capacidades del cuerpo de bomba situadas encima y debajo de aquel. M. Deleuil daba primeramente al émbolo una altura doble de su diámetro y obtenia un vacío de 8 á 18 milímetros, segun la capacidad. Despues, aunque dió al diámetro del émbolo un valor igual al de su altura, pudo obtener con su máquina un vacío de 2 á 3 milímetros en una capacidad de 14 litros; en un cuarto de hora ha logrado hacerlo de 10 milímetros en un recipiente de 250 litros.

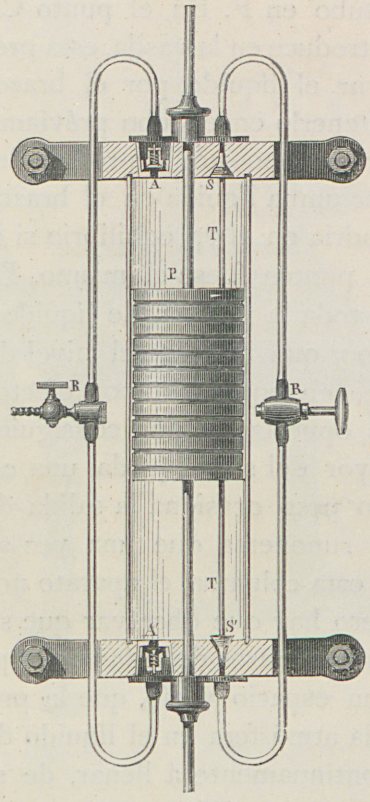


Fig. 215.—Embolo de la máquina neumática de Deleuil

Más adelante nos ocuparemos de las variadas aplicaciones del vacío neumático, como caminos de hierro y estaciones atmosféricas, etc.

V

SIFON.—PIPETA, EMBUDO MÁGICO, BOTELLA INAGOTABLE

Describamos además otro instrumento que todo el mundo conoce con el nombre de *sifon* y que se usa mucho para trasvasar los líquidos de un recipiente á otro; como se verá, tambien es la presion del aire la que origina la salida del líquido.

El sifon consiste en un tubo encorvado de brazos desiguales, el cual se llena del líquido que se quiere trasvasar, y se introduce en segui-

da por su brazo menor en el recipiente que lo contiene (fig. 217).

Tan luégo como se le ha colocado de este modo, se ve salir el líquido por el orificio del brazo mayor, y así continúa miéntras el menor siga sumergido.

¿Cuál es la causa de esta salida continua? Fácilmente se comprenderá. La presion atmosférica actúa con intensidad igual y de sentido contrario en la superficie AB del líquido contenido en la vasija, y en la extremidad inferior y libre del tubo en F. En el punto C en que el tubo se introduce en la vasija, esta presion sirve para elevar el líquido por el brazo menor ó para mantenerlo en el tubo préviamente lleno; en el extremo opuesto, la presion del aire sostiene la columna líquida en el brazo mayor, y la mantendria en él en equilibrio si el nivel de estos dos puntos fuese el mismo. De aquí resulta que toda la porcion de líquido contenida en el tubo y que traspase el nivel de la vasija permanece en equilibrio por efecto de estas presiones opuestas, y por consiguiente en el brazo mayor del sifon queda una columna de agua cuyo peso ocasiona la salida del líquido.

Podria suponerse que una vez salido el líquido de esta columna, el aparato no funcionaria ya; pero hay que observar que si las capas líquidas se separasen deberian dejar por encima de ellas un espacio vacío, que la presion ejercida por la atmósfera en el líquido de la vasija tiende continuamente á llenar, de suerte que realidad no se verifica esta separacion y la salida es continua.

Las formas de los sifones difieren segun el uso que se quiera hacer de ellos, así como con arreglo á la naturaleza del líquido que se ha de trasvasar.

Una importante aplicacion del principio del sifon es la que tiene por objeto la conduccion de aguas á grandes distancias, al través de terrenos accidentados cuya pendiente no es regular ni continua. Los antiguos romanos, de cuyas construcciones hidráulicas subsisten aún tan notables vestigios, edificaban inmensos acueductos para atravesar los valles, á costa de enormes dispendios. Con todo, en ciertas ocasiones supieron prescindir, merced al uso de sifones formados de tubos de plomo, de construir acueductos cuya elevacion hubiera hecho su ejecucion imposible; de ello tenemos un ejemplo en el acueducto del monte Pila cerca de Lyon, que debia cruzar tres cañadas, una de ellas de 100 metros de profundidad. En nuestros dias no se construyen ya elevados acueductos, y se los sustituye con sifones de palastro, infinitamente ménos costosos.

Así es como las aguas del Dhuys y del Vanne atraviesan muchos valles ántes de llegar á Paris.

En el *sifon* acabamos de ver una aplicacion interesante y útil de la presion del aire para la salida ó trasvasacion de los líquidos. La *pipeta* es un pequeño instrumento que tiene un objeto análogo: con él se puede sacar una porcion de líquido de una vasija ó de un tonel que no se quiera remover. Es un tubo de punta aguda, de hojalata ó vidrio, que se sumerge en el líquido y que se llena por simple comunicacion ó bien por aspiracion.

Una vez llena la pipeta, se sostiene como lo indica la figura 220, tapando con el dedo la abertura superior, y en seguida se la saca de la vasija. La presion atmosférica ejercida sobre el líquido en el orificio inferior basta para mantenerlo en el tubo; pero si se quita el dedo y se da paso al aire, la presion exterior se ejerce en la superficie interna, contrabalancea la que comprimia y retenia el líquido inferior, y el líquido sale por su propio peso.

Por lo demás, se puede contener la salida y hacer que comience de nuevo poniendo ó quitando el dedo. Esto es lo que verifican los prestidigitadores con el *embudo mágico* y con la *botella encantada* ó *inagotable*, aparatos cuyo manejo es fácil comprender.

La figura 221 representa el embudo mágico. Como se ve, es un embudo de doble fondo, cuya cavidad interior é invisible está llena de un líquido, de vino por ejemplo. Con el pulgar se tapa ó destapa un agujerito abierto junto al asa, y otro agujero interior pone en comunicacion la capacidad llena de líquido con el tubo interior aparente del embudo. Al quitar el pulgar, el vino sale; pero su salida cesa á voluntad del operador si tapa el agujero superior.

Si se echa agua en la capacidad visible del embudo, saldrá agua pura ó una mezcla de agua y vino, segun que se tape ó destape la abertura inmediata al asa, y los espectadores creen

que se puede hacer salir como se quiera agua ó vino del embudo mágico.

La *botella inagotable* es una botella que contiene en su interior varias divisiones, cada una de las cuales está llena de diferente clase de líquido. Cada division ó compartimiento (figura 222) comunica con el exterior por un agujerito abierto en la pared de la botella, y que el operador abre ó cierra á su albedrío con los dedos. Puede pues verter la clase de licor que le plazca, ó que el espectador le pida, y hasta hacer una mezcla vertiendo dos ó varios licores á la vez.

Como se ve, estos experimentos de física recreativa están basados en la accion de la presion atmosférica, cuyas aplicaciones más sérias, y sobre todo más útiles, vamos á estudiar ahora.

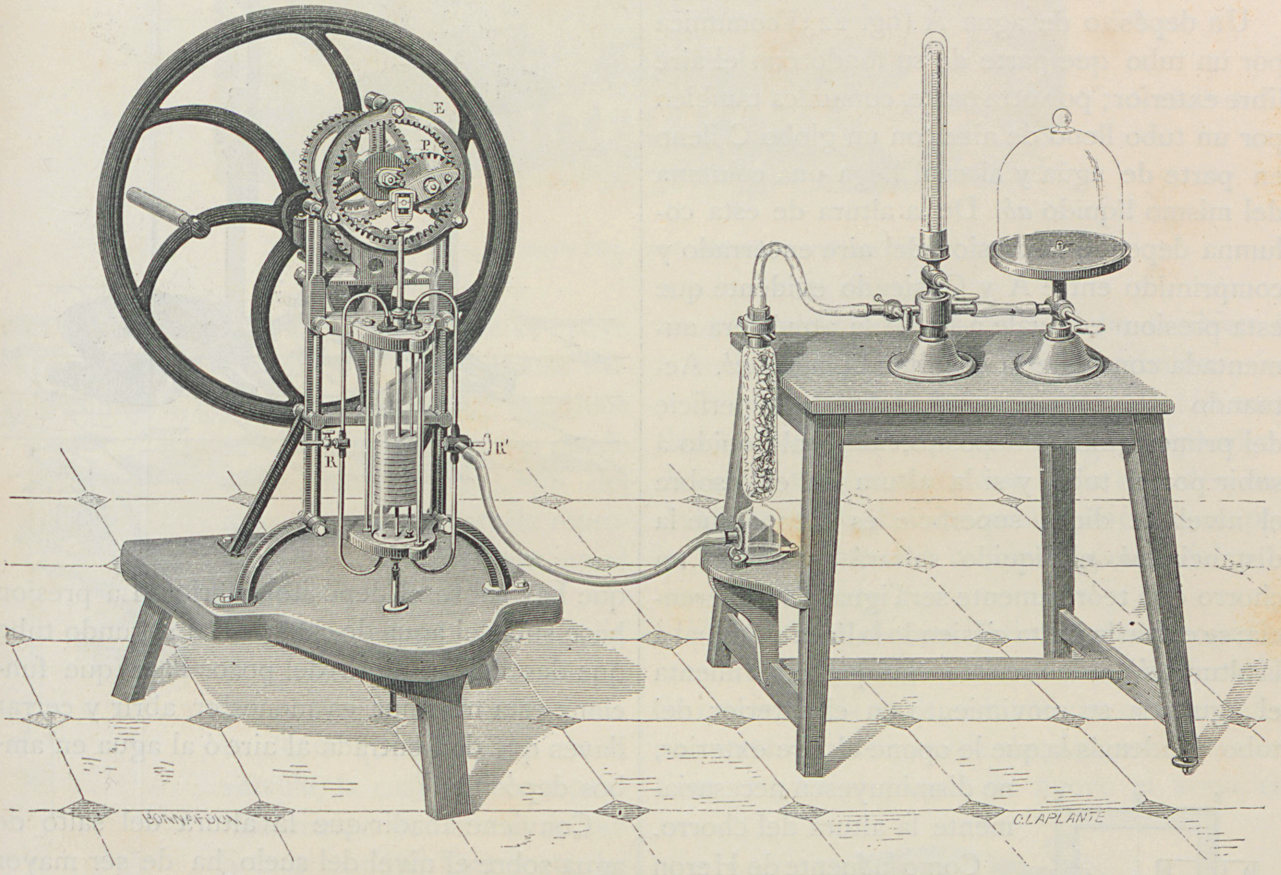


Fig. 216.—Máquina neumática de Deleuil

CAPÍTULO VI

LA PRESION ATMOSFÉRICA EMPLEADA COMO FUERZA MOTRIZ

I

FUENTE DE HERON.—MÁQUINAS DE AGOTAMIENTO. ESCOPETA DE VIENTO

Se puede emplear la presion del aire como fuerza motriz de dos modos distintos: ó, como en las bombas, se hace actuar la presion atmosférica ó exterior de fuera á dentro en un espacio vacío, ó á lo ménos en un espacio del que se haya extraido el aire más ó ménos totalmente de modo que su presion sea muy inferior á la de la atmósfera; ó bien se emplea el aire comprimido, resultando entónces una presion superior á la de la atmósfera que obra de dentro afuera.

En ambos casos, ya sea para hacer el vacío ó ya para comprimir el aire, se usan máquinas especiales, como las neumáticas ó las de com-

presion; pero estas mismas requieren para funcionar un motor, una fuerza natural, la fuerza muscular, los saltos de agua, el vapor, etc.

Las aplicaciones más antiguas de estos dos modos de actuar la presion del aire las idearon, la primera, Ctesibio, el inventor de las bombas, y la segunda, Heron de Alejandría, matemático griego á quien se atribuye la invencion del pequeño aparato que hay en todos los gabinetes de física y cuya descripcion vamos á hacer.

Un depósito de agua A (fig. 223) comunica por un tubo que parte de su fondo con el aire libre exterior; por otra parte, comunica tambien por un tubo lleno de aire con un globo C lleno en parte de agua y al cual llega una columna del mismo líquido *ab*. De la altura de esta columna depende la presion del aire encerrado y comprimido entre A y C, siendo evidente que esta presion equivale á la de la atmósfera aumentada con la de la columna de agua *ab*. Actuando esta presion en A sobre la superficie del primer globo ó depósito, obliga al líquido á subir por el tubo, y si la altura de este sobre el nivel de dicha superficie es menor que la distancia *ab*, el líquido saltará formando un chorro que teóricamente será igual á su diferencia; se elevaria hasta *a'* (siendo la línea *a'b'* igual á la altura *ab*), si las resistencias que experimenta el agua en su movimiento en el interior del tubo, y además la que le opone el aire exterior, no disminuyesen necesariamente la altura del chorro.

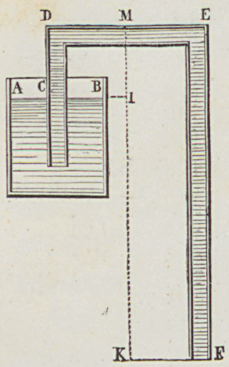
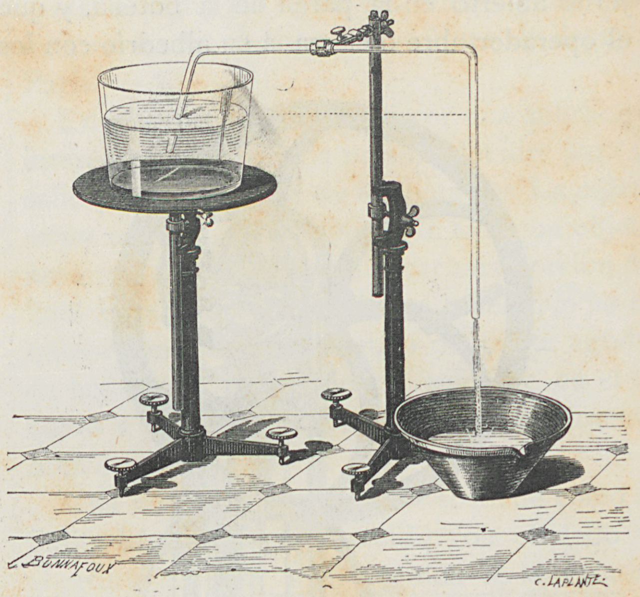


Fig. 217.—Teoría del sifon

Como la fuente de Heron no se reduce á ser un simple objeto de curiosidad en la historia de la física, debemos mencionarla aquí con doble motivo: y en efecto, se ha reproducido su estructura y aplicado su principio á la construccion de máquinas de agotamiento, como por ejemplo las que funcionan en las minas de Schemnitz en Hungría, y que no son otra cosa sino gigantescas fuentes de Heron, si bien construidas con la solidez necesaria para emplearlas con tal objeto.

Un salto de agua que cae desde cierta altura sobre el suelo superior del pozo de la mina, comprime el aire de un depósito representado en la fuente de Heron por el globo A y que está instalado en el orificio del pozo. Este depósito se comunica por un tubo con otro establecido en el fondo de la mina, á cuyo segundo depósito van á parar las aguas cuyo agotamiento se desea. El aire comprimido en el primer recipiente trasmite su fuerza por el tubo al aire


Fig. 218.—Sifon

que hay sobre el depósito inferior. La presion hace subir el agua de este por un segundo tubo que desemboca fuera del pozo. Para que funcione esta máquina es menester abrir y cerrar llaves que dan entrada al aire ó al agua en ambos depósitos.

Conviene añadir que la altura del salto de agua sobre el nivel del suelo ha de ser mayor que la profundidad de la mina debajo de dicho salto. De lo contrario, y prescindiendo de las pérdidas de fuerza, el agua no subiria hasta fuera del pozo y por consiguiente el agotamiento seria imposible.

En la fuente de Heron lo propio que en las máquinas de Schemnitz, el aire obra como motor; se utiliza la presion en estado dinámico. Otro tanto sucede con la *escopeta de viento*.

Esta escopeta es una de las aplicaciones más antiguas del aire comprimido, pues se hace remontar su invencion á Gutter de Nuremberg, que vivia hácia 1560; y áun parece que los antiguos conocieron una máquina por el estilo, puesto que, segun Filon, Ctesibio construyó un tubo que disparaba una flecha mediante la fuerza del aire comprimido. Sea de ello lo que

quiera, lo cierto es que las tropas usaron algun tiempo el arcabuz de viento. Hoy no es más que un arma de curiosidad, cuyo mecanismo es muy sencillo.

La culata de la escopeta (fig. 224) es hueca y metálica; es el depósito en cuyo interior se comprime el aire con una bomba de compresion. En otro tiempo, esta bomba iba metida en la misma culata, y el depósito de aire comprimido era el espacio anular comprendido entre el cañon de la escopeta y un cilindro de mayor calibre que lo rodeaba. La culata M se comu-

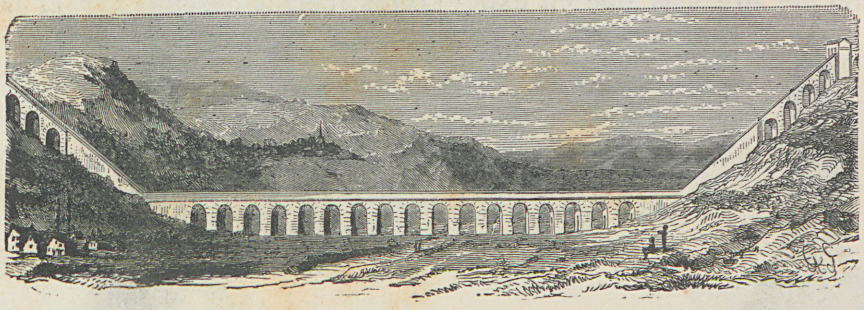


Fig. 219.—Acueducto del monte Pila, construido por los romanos cerca de Lyon

nica con la parte del cañon en donde se apoya el proyectil por un orificio provisto de una válvula cónica S, que el aire comprimido mantiene cerrada, pero que se puede abrir mediante el juego del mecanismo de la batería representada detalladamente en el grabado.

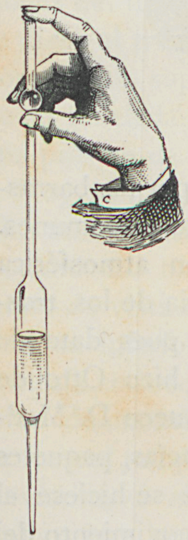


Fig. 220.—Pipeta

Oprimiendo el pié de gato *d*, el gatillo cae sobre la pieza *e* cuya parte inferior empuja una varilla *tt'* que comunica con la válvula, la cual se abre espontáneamente por efecto de tan brusco empuje. Una parte del aire comprimido sale de la culata é impele la bala con una fuerza que depende de la presion hecha para cargar la escopeta de viento. Por lo comun, esta es de ocho ó diez atmósferas, y como el aire sólo se escapa en corta cantidad al primer tiro, se pueden hacer muchos disparos seguidos. La velocidad con que salen los proyectiles disparados con la escopeta de viento llega casi á la de las balas que se disparan con una escopeta comun; no cabe duda de que la presion inicial del aire comprimido es menor que la de los gases engendrados por la inflamacion de la pólvora; pero en compensacion, es constante todo el tiempo que invierte el proyectil en recorrer el cañon, al cual se da gran longitud por este motivo: la velocidad de salida se debe tambien á la accion prolongada del aire comprimido.

En los antiguos arcabuces de viento, se metian las balas en un pequeño depósito provisto de una llave, y conforme se abria esta despues de hecho un disparo, un nuevo proyectil ocupaba en el ánima del cañon el puesto del primero.

De todos modos, es fácil comprender que la fuerza de proyeccion va disminuyendo á medida que se vacía el depósito de aire comprimido, de suerte que despues de disparar unos cuantos tiros es preciso cargar de nuevo el arma, es

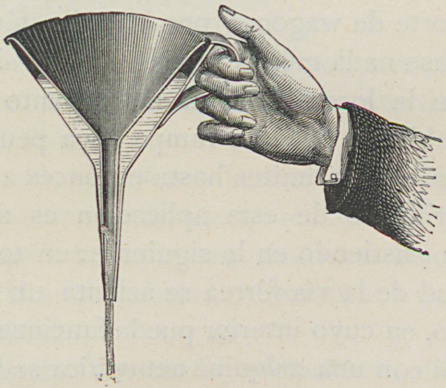


Fig. 221.—Embudo mágico

decir, comprimir otra vez el aire. Tan grave inconveniente no ha permitido dar á esta escopeta una aplicacion práctica de trascendencia.

La escopeta de viento produce detonacion, pero mucho ménos fuerte que la de las armas de fuego del mismo calibre. Del cañon sale tambien un resplandor, que sin duda reco-

noce por causa la inflamacion de las partículas sólidas arrastradas por la corriente aérea. En concepto de M. Daguin, esta inflamacion procede de la electricidad desarrollada por el roce del taco y de las partículas de que hablamos con las paredes interiores del cañon.

Como se ve, hasta el presente apénas se ha utilizado la presion del aire más que en experimentos de física, y excepcion hecha de las bombas y de las máquinas de agotamiento de Schemnitz, no ha dado lugar á ninguna aplicacion industrial de verdadera importancia. Vamos ahora á verla, bien en estado estático ó ya en el dinámico, utilizada en circunstancias especiales, en que las más veces no hubieran podido otras fuerzas desempeñar el mismo cometido.



Fig. 222. —Botellas inagotables

II

FERRO-CARRILES ATMOSFÉRICOS

Entre las más curiosas aplicaciones de la fuerza en cuestion, debemos citar el uso de las máquinas neumáticas y del vacío para el trasporte de wagones por las vías férreas. Tratábase nada ménos que de lograr, sin el auxilio de la locomotora, el movimiento de un tren subiendo por una rampa cuya pendiente excedia de los límites hasta entónces adoptados. El principio de esta aplicacion es muy sencillo, consistiendo en lo siguiente: en toda la longitud de la vía férrea se asienta un tubo metálico, en cuyo interior pueda funcionar un émbolo. Si con una máquina neumática se hace el vacío en el tubo á uno de los lados del émbolo, la presion atmosférica actuará en el otro lado sobre su superficie, y pondrá en movimiento el émbolo y los cuerpos graves á los cuales esté sólidamente unido. Si estos cuerpos graves son los wagones de un tren, el movimiento de propulsion del émbolo se comunicará á ellos, y con tal que la fuerza obtenida de este modo sea suficiente, podrá hacerlos rodar por las barras-carriles, sin necesidad de los motores comunes.

La idea de utilizar la presion atmosférica como fuerza motriz en la industria de los trasportes y acarreos no es nueva; pues data de los primeros experimentos que hizo Otto de Guericke: en 1810, el ingeniero sueco D. Medhurst propuso trasportar mercancías, paquetes y cartas por un tubo en el que se hiciese el vacío; y además, comunicar el movimiento del émbolo á algunos carruajes que corrieran por fuera del tubo. En 1824, el inglés Wallance concibió la idea de trasmitir directamente á los wagones la presion de la atmósfera; pero estos debian circular por el interior del tubo en que se hiciese el vacío. Por último, en 1848 se construyó en Irlanda el primer ferro-carril atmosférico, de unos tres kilómetros de longitud, entre Kingstown y Dalkey. Los ingenieros Clegg y Samuda se basaron en el sistema de Medhurst, aunque perfeccionándolo. Hiciéronse otras muchas pruebas en Inglaterra, en Pouth Devor, en Croydon, y en Francia en un trecho de la línea de Paris á San German. Digamos unas

cuantas palabras acerca del mecanismo adoptado en esta última línea.

La figura 225 representa una seccion diametral del tubo de 63 centímetros, por cuyo interior corria el émbolo en el camino de hierro atmosférico de Pecq á San German. Este tubo, fijo en medio de la vía, tenia una hendidura longitudinal, por la cual pasaba la barra que unia al émbolo con el primer wagon. Delante del émbolo ó hácia el lado del espacio vacío, la hendidura estaba cerrada por una tira de cuero reforzada por cortas placas de palastro, que hacia las veces de válvula, y una serie de ruedas en disminucion, sostenidas por las ramas del émbolo, levantaba dicha válvula á medida que avanzaba la barra que unia la varilla del piston con el tren.

Hacíase el vacío en el tubo con máquinas neumáticas, compuestas de cuatro cuerpos de bomba de doble efecto y movidas por una máquina de vapor. Se habian calculado las dimensiones del tubo y de las máquinas de modo que se diese al tren una velocidad de un kilómetro por minuto, suponiéndolo cargado con un peso de 54 toneladas, y limitándose á un vacío de una presion de un tercio de atmósfera.

Hoy, se han abandonado todos los ferro-carriles atmosféricos, no porque fuese malo su funcionamiento mecánico, sino porque, desde el punto de vista económico, este sistema de traccion es inferior al de las locomotoras, y en demasía costoso. La invencion de las locomotoras de montaña, propias para la ascension de fuertes rampas, ha tenido por consecuencia inevitable el abandono de que acabamos de hablar. Las locomotoras recorren desde 1859 la empinada rampa (0^m,035 por metro) de Pecq á San German.

III

CONSTRUCCION DE PILAS DE PUENTES UTILIZANDO EL AIRE COMPRIMIDO

Se ha dado tambien al aire comprimido una aplicacion de otro género, la cual no es ménos interesante que cuantas hemos descrito. Se le ha utilizado para expeler el agua de los cajones metálicos destinados á formar los cimientos de las pilas de los puentes, debiéndose al ingeniero francés M. Triger la primera idea y la invencion del primer método de esta clase. Se han empleado distintos procedimientos segun las circunstancias y los planos de los ingenieros que han hecho aplicacion de este método; pero como el principio físico es el mismo, bastará describir sucintamente uno de aquellos para dar

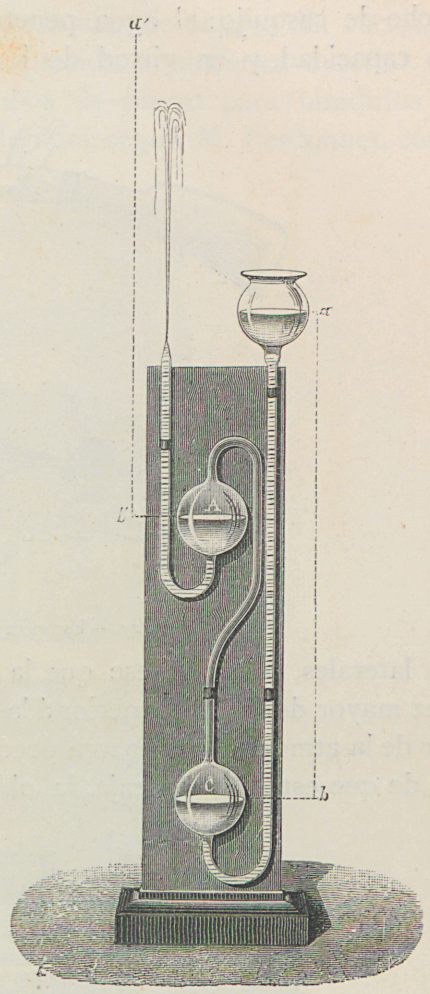


Fig. 223.—Fuente de Heron

idea de los demás. Véase en qué consiste el adoptado para la construccion del puente de Kehl, sobre el Rhin.

La figura 226 representa la instalacion de una de las obras de cimentacion, viéndose en el interior de uno de los cajones colocados debajo del lecho del rio, á los trabajadores ocupados en extraer escombros.

Supongamos una enorme caja de palastro, de paredes sólidamente atornilladas y reforzadas, tanto interior como exteriormente, con puntales y contrafuertes de hierro; esta caja de forma rectangular, está abierta en su base inferior, al paso que la superior, que tiene tres aberturas circulares, remata en otras tantas chimeneas de hierro; las dos chimeneas laterales, que comunican simplemente con el interior de la caja,

tienen sobre ellas una cámara de aire; la del medio desciende hasta más abajo de la base inferior del cajon. Supongamos ahora que se baja esta especie de campana de buzo al fondo del rio, de modo que su base abierta descanse en el lecho de casquijo: el agua penetrará en toda su capacidad, y en virtud de la ley de equilibrio de los líquidos en los vasos comunicantes, se elevará por las tres chimeneas hasta el nivel del agua del rio. Si entónces, con ayuda de máquinas insuflantes ó de bombas de compresion movidas por vapor (estas máquinas se ven instaladas en un barco, á la derecha del grabado) se hace penetrar aire en las dos chi-

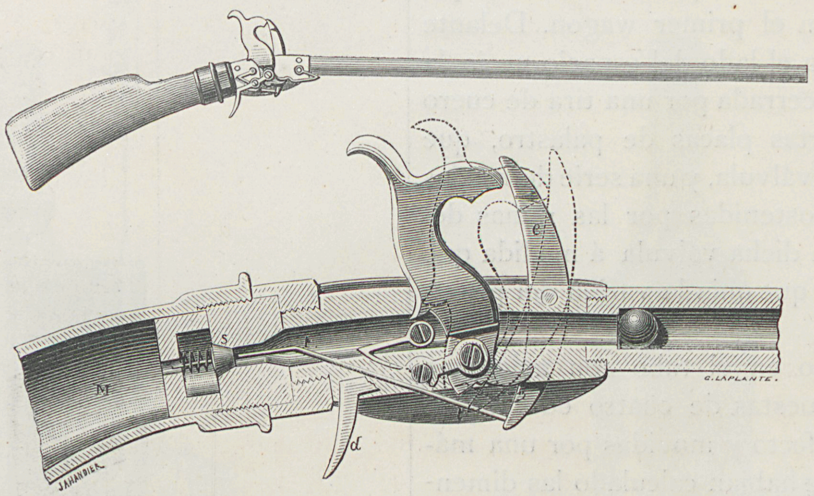


Fig. 224.—Escopeta de viento (vista exterior y seccion longitudinal)

meneas laterales, compréndese que la presion cada vez mayor del flúido, superior á la presion exterior de la atmósfera, rechazará poco á poco el agua de que está llena la caja, la obligará á escaparse por los intersticios de los bordes inferiores, y dejará vacío, por no decir en seco, el lecho de casquijo en que aquella descansa. La chimenea del medio, que penetra hasta la

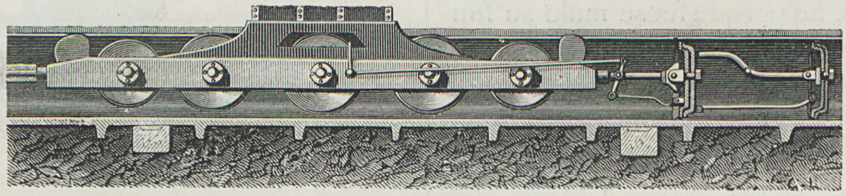


Fig. 225.—Tubo neumático del camino de hierro atmosférico de San German

arena, será la única que continúe llena de agua. Los trabajadores encargados de abrir los cimientos bajan entónces por unas cámaras que forman esclusas y por las chimeneas laterales al interior del cajon, lleno de aire comprimido. Protegidos por una presion de dos ó tres atmósferas que los preserva de la invasion de las aguas del rio, socavan el terreno cuyos escombros van echando hácia la base de la chimenea central. Una draga ó noria, metida en esta chimenea, sube sus arcaduces y vierte en un barco los escombros susodichos. Además, la obra de mampostería, que se va construyendo sobre el piso superior, gravita con su peso sobre el cajon, obligándole á bajar hasta que llega á la profundidad apetecida. Entónces los obreros suben: la caja, lo mismo que los agujeros de las tres chimeneas, se llenan de cemento hidráulico, y con esto quedan terminados los cimientos.

El puente de Kehl está formado de dos estribos y cuatro pilas; cada una de las dos pilas de los lados descansa en cuatro cajones; las otras dos, ménos fuertes, en tres cajones solamente.

No deja de ser peligroso para los operarios el trabajo en un recinto en que el aire está á tan gran presion. Más adelante dedicaremos á este asunto un artículo especial.

El procedimiento de construccion de las pilas de los puentes por medio del aire comprimido se ha aplicado con ventaja siempre que la profundidad del lecho del rio ó del brazo de

mar sobre el que se debia tender el puente, la rapidez de la corriente ó la composicion de las capas del terreno oponian obstáculos á los métodos comunes. Citaremos algunas de estas construcciones más notables: en Francia, los puentes de Mâcon, de Burdeos y de Argenteuil; en Inglaterra, los de Rochester y de Saltash; en los Estados Unidos, el gigantesco puente de San Luis sobre el Mississippí. En la figura 227 presentamos el corte vertical de una de las pilas edificada en parte de esta última obra (1).

Antes de utilizar el aire comprimido para esta clase de trabajos, un ingeniero inglés habia concebido la idea de valerse del vacío: en este caso, la presion atmosférica exterior actuaba sobre tubos de hierro para hundirlos bajo el agua. Hé aquí, segun M. Perdonnet, cómo procedió este ingeniero, el doctor Post, para la construccion de las pilas del viaducto de Anglesey, en el camino de hierro de Chester á Holyhead:

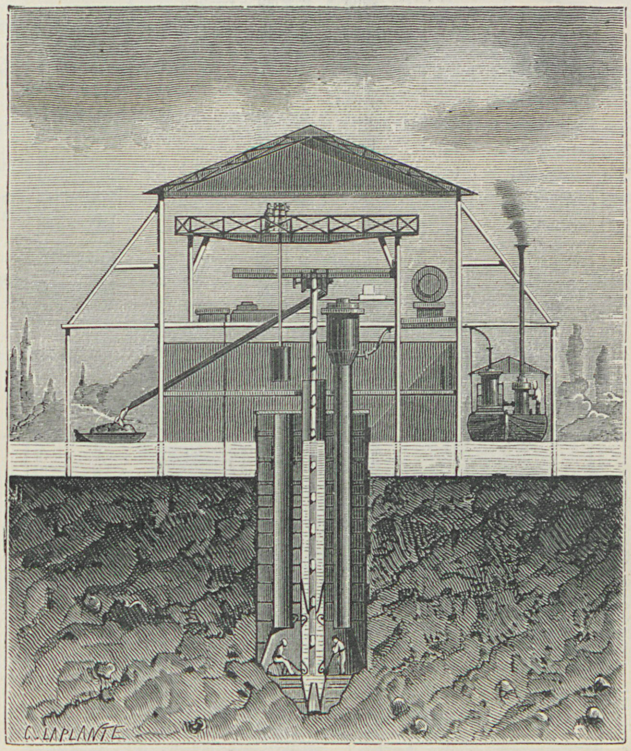


Fig. 226. — Construccion de los machones del puente de Kehl valiéndose del aire comprimido

«En el suelo bañado por el agua, que puede ser de arena, de arcilla ó de légamo, hundió en parte un tubo de hierro abierto por abajo y cerrado por arriba con una tapa dada cuidadosamente de betun y que comunicaba con una bomba neumática. Hacia funcionar esta bomba, y tan luégo como la presion disminuia lo suficiente en el interior del tubo, el agua exterior y hasta el suelo mismo, tendian á precipitarse en él en virtud de la presion atmosférica; la corriente de agua que se producia en la parte inferior socavaba el terreno bajo el tubo, rompiendo las arcadas naturales que las partes sólidas forman entre sí, y el tubo bajaba por su propio peso, aumentado con la presion de la atmósfera en su extremo superior. Cuando el tubo estaba lleno, su contenido, compuesto de agua y de partes sólidas, se extraia de cualquier modo, y se daba de nuevo principio á la operacion hasta llegar á la profundidad necesaria.

(1) «La ejecucion de los cimientos de las pilas del puente de San Luis presentaba las mayores dificultades. Las dos pilas construidas en el rio tienen respectivamente $44^m,25$ y $52^m,10$ de altura sobre la roca en que descansan. Lo que dificultaba más este trabajo, era que en el Mississippí hay corrientes de fondo sumamente violentas, que arrastran consigo grandes masas de arena y producen hoyos y cavidades considerables. Como ejemplo de estos arrastres, cítase el caso del vapor *América*, que se perdió en el rio, á unas 100 millas más allá de su confluencia con el Ohio. Acumulóse la arena alrededor de dicho buque, lo cubrió completamente, y formó una isla que adquirió suficiente extension para que se edificase en ella una granja y se estableciese una plantacion de algodon, cuyos desperdicios bastaban para suministrar combustible á todos los vapores que recorrian aquella region. Pero el rio tuvo dos crecidas seguidas, que hicieron desaparecer completamente la isla, dejando en descubierto el casco del vapor sumergido.» (*Anales industriales*, agosto de 1874.)

IV

PERFORACION DE TÚNELES POR MEDIO DEL AIRE COMPRIMIDO.—TÚNEL DEL MONTE-CENIS

En los trabajos de la industria contemporánea se ha utilizado y se sigue utilizando en varias circunstancias la fuerza del aire comprimido. Citemos los ejemplos más notables de esta aplicacion.

En primer lugar debemos hacer mencion de la perforacion del inmenso subterráneo hoy dia terminado que atraviesa los Alpes un tanto al sur del monte Cenis, y que enlaza las estaciones de Bardoneche y de Modane, estaciones

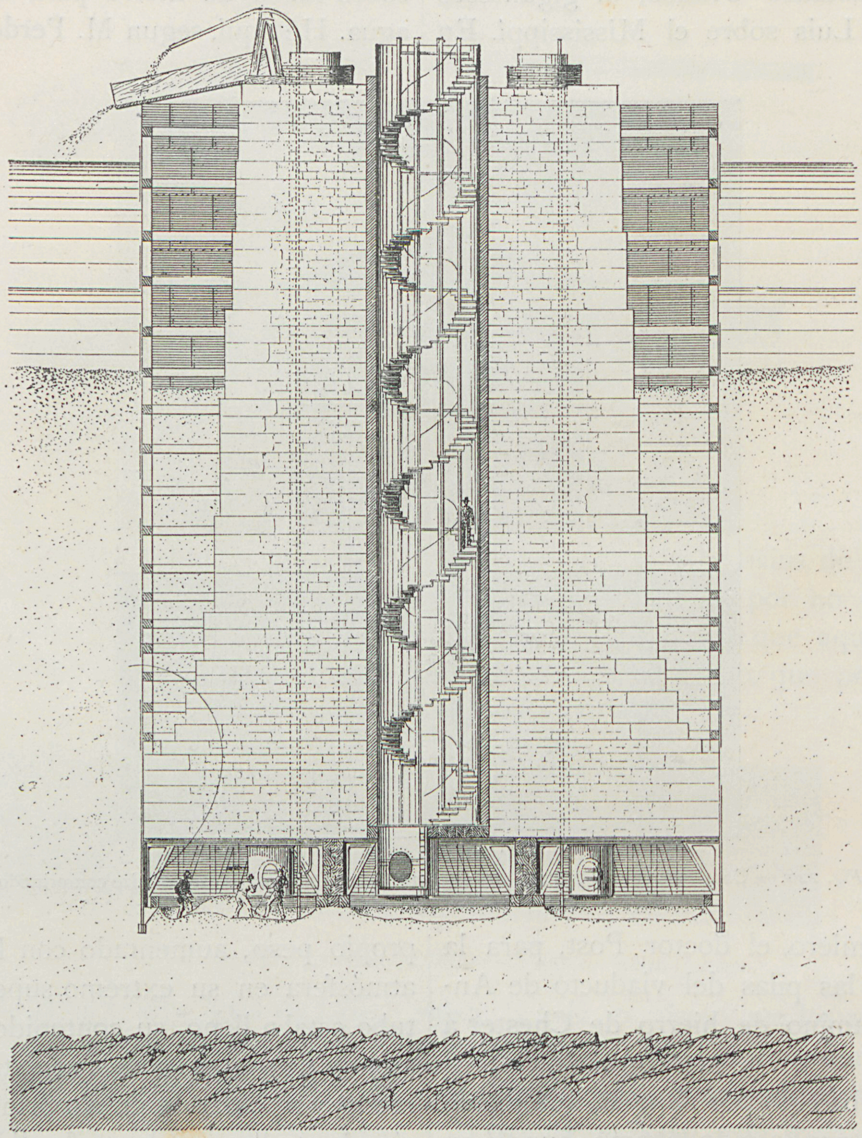


Fig. 227.—Puente de San Luis sobre el Mississippí. Construccion de sus pilas mediante el aire comprimido

extremas del camino de hierro de Víctor Manuel. Habia que abrir allí una galería de más de 12,000 metros en la roca, es decir, más de 700,000 metros cúbicos de escombros que extraer, y debia ejecutarse tan inmenso trabajo á profundidades en las que no se podia hacer uso de los medios comunes de perforacion de los subterráneos. Tampoco se podian abrir pozos de trecho en trecho en el seno de la galería proyectada.

Como no era posible practicar la apertura de tan prolongado túnel sino por dos puntos opuestos, ó sea sus dos extremos, pareció casi imposible emplear el vapor y la pólvora para abrir los agujeros de mina, derribar y fraccionar las rocas; á medida que se hubiera penetrado más y más en el interior de la montaña, se habria tropezado con mayores dificultades para ventilar los talleres, para reemplazar con aire puro el aire del subterráneo, viciado por la mezcla de los gases de la pólvora y del vapor de agua, por la combustion de los hornillos de las máquinas y

por la de las lámparas, y finalmente, por los gases procedentes de la respiracion de los tra-

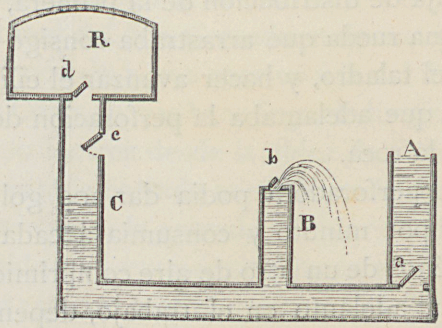


Fig. 228.—Compresor de ariete (figura teórica)

bajadores. Los ingenieros Sommeillier, Grandis y Grattone se propusieron poner en práctica una idea emitida ya por M. Colladon y algo despues por Ceiligny, la de valerse del aire comprimido como fuerza motriz de las máquinas que habian de usarse para abrir los barrenos en la roca.

Los compresores, ó máquinas para comprimir el aire en los depósitos ó recipientes debian sacar á su vez su fuerza de un salto de agua inmediato (el riachuelo de Melezet en Bardonneche, y el del Arc en Modana). En un principio eran *compresores de golpe* ó *de ariete*, así llamados del modo cómo actuaba el agua en tres tubos verticales, provistos de válvulas para repeler el aire al recipiente. El agua llegaba por el tubo A (fig. 228) cuya válvula *a* se abria y cerraba alternativamente miéntras la válvula *b* del tubo B se cerraba y abria á su vez: una

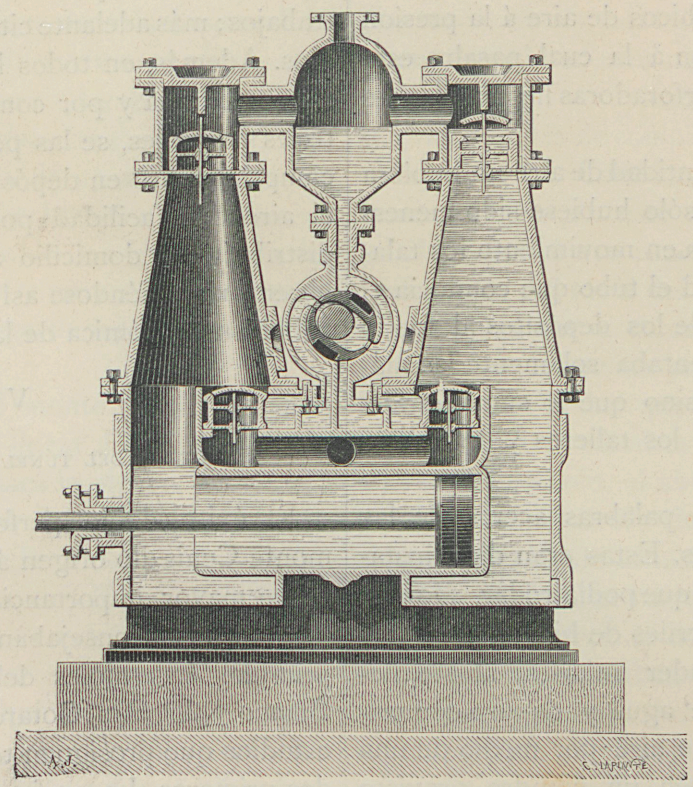


Fig. 229.—Compresor de doble efecto, sistema Fryer de Nueva York

maquinita especial hacia funcionar estas válvulas. El agua encontrando abierta la *a* y cerrada la *b*, penetraba en el tubo C, y subiendo por él comprimia el aire recogido del exterior por la válvula *e*. Esta se cerraba, al paso que el aire, cada vez más comprimido, forzaba la válvula *d* y se introducia en el recipiente R. Entónces la válvula *b* se abria y la *a* se cerraba; el agua salia por el tubo B; *e* se abria y daba paso á otra cantidad de aire exterior, que mediante una nueva maniobra se comprimia introduciéndose en el recipiente R. Despues los ingenieros reemplazaron los compresores de golpe por otros de doble efecto, de mecanismo más sencillo y que utilizaban mejor la fuerza del salto de agua. Daremos algunos detalles acerca del modo cómo funcionaban estas máquinas en Modana.

Doce bombas de compresion recibian su movimiento de seis ruedas hidráulicas que la caida del Arc hacia girar directamente. Cada una de ellas consistia en un émbolo animado de un

movimiento de vaiven en un cuerpo cilíndrico horizontal. A los dos extremos del cilindro habia adaptados dos tubos verticales cilindro-cónicos, cada uno de ellos con dos válvulas: una de aspiracion, que es la que se ve en la fig. 229 en la parte inferior del tubo de forma cónica y que recibia el aire exterior, y otra de expulsion que introducia el aire comprimido por la ascension del agua dándole paso al tubo correspondiente. El movimiento del émbolo, al rechazar el agua á uno de los cilindros, hace que baje su nivel en el otro, y por consiguiente el aire resulta comprimido en el primero y enrarecido en el segundo.

Teniendo en cuenta las pérdidas ocasionadas por los escapes, los doce compresores comprimian por término medio en veinticuatro horas 116,500 metros cúbicos de aire á la presion ordinaria, y la presion á la cual pasaba este aire á las máquinas perforadoras llegaba á siete atmósferas.

Tan considerable cantidad de aire no hubiera sido necesaria, si tan sólo hubiese sido menester la fuerza que ponia en movimiento los taladros. Pero en realidad el tubo que conducia el aire comprimido desde los depósitos al fondo de la galería no alimentaba solamente las máquinas perforadoras, sino que lo suministraba para la ventilacion de los talleres y de toda la galería.

Añadamos algunas palabras acerca de las máquinas perforadoras. Estas eran diez, instaladas sobre un afuste, que podia rodar, avanzar ó retroceder sobre carriles de hierro, y un carreton, especie de tender unido al afuste, llevaba los depósitos de agua y de aire comprimido. Introducido este aire por medio de una caja de distribucion en un cilindro provisto de un émbolo, comunicaba á este último y á su vástago el movimiento de vaiven que, trasmitido á los taladros, producia el choque repetido de las herramientas sobre la roca. Pero, además de este movimiento longitudinal ó de choque, cada taladro estaba animado de otros dos indispensables para la clase de trabajo que cada uno de ellos debia ejecutar. Al abrir un agujero debia girar poco á poco sobre sí mismo como una barrena, y avanzar además á medida que el agujero era más profundo. Ambos movimientos los producia una maquinita lateral movida por el aire comprimido como la otra, y que servia á la vez para regular el movimiento de la caja de distribucion de la primera, actuar sobre una rueda que arrastraba consigo el émbolo y el taladro, y hacer avanzar el cilindro á medida que adelantaba la perforacion del agujero en la roca.

Cada perforadora podia dar 200 golpes de taladro por minuto y consumia á cada golpe algo ménos de un litro de aire comprimido. En cuanto al adelanto en el trabajo, dependia de la clase y la dureza de la roca.

El éxito de esta aplicacion del aire comprimido como fuerza motriz en una empresa en la que no se podia hacer uso del vapor, ó si acaso muy difícilmente, ha sugerido la idea de hacer extensivo el empleo de dicha fuerza á otros trabajos; más adelante citaremos algunos ejemplos. Además, en todos los países en que hay saltos de agua y por consiguiente fuerzas motrices naturales, se las podria aprovechar para comprimir aire en depósitos fijos, y circulando el aire con facilidad por tubos, seria posible distribuirlo á domicilio á toda una poblacion obrera, resolviéndose así el problema de la distribucion económica de la fuerza.

V

APERTURA DEL TÚNEL DEL SAN GOTARDO

El éxito de la perforacion del túnel del monte Cenis dió orígen á proyectos de análoga y áun mayor importancia, en los que las mismas razones aconsejaban el uso del aire comprimido. Las moles del Simplon, del monte Blanco y del San Gotardo han sido objeto de estudios que prosiguen todavía respecto de los dos primeros. La perforacion del último se ha emprendido y ejecutado ya gracias al concurso de Suiza, Italia y Alemania, llevándose esta última potencia la mira de desviar en su provecho el tránsito de Oriente y del Mediterráneo hácia Inglaterra y los puertos del mar del Norte. Si como es de esperar se abre un tercer túnel en los Alpes, ya sea en el Simplon ó bien en el monte Blanco, se restablecerá el equilibrio con gran ventaja de Francia. Pero lo que aquí nos interesa, lo que va á obligarnos á entrar en nuevos detalles acerca de las gigantescas aplicaciones del aire comprimido como fuerza

motriz, son los perfeccionamientos introducidos en los procedimientos mecánicos ya puestos en práctica en el monte Cenis.

El túnel del San Gotardo es de una longitud que excede en 2,700 metros á la del túnel del monte Cenis, lo que hace llegar la longitud total á 14,900 metros desde la aldea de Göschenen, donde está la entrada norte, hasta la de Airolo, de donde parte la entrada sur; por consiguiente ha habido que extraer una masa total de roca de unos 750,000 metros cúbicos. Las dificultades con que se tropezaba eran todavía mayores que en el desfiladero de Frejus: á partir de Göschenen se encontraron rocas graníticas en un trecho de 2,500 metros; á estas siguieron calizas silíceas, y hasta á un kilómetro de Airolo gneiss micáceos ó anfibólicos; por último, desde el principio, unos 1,000 metros de capas calizas que habia en la entrada sur dieron mucho que hacer á causa de las considerables filtraciones que allí resultaron y cuyas copiosas aguas inundaron los trabajos más de un año. A pesar de estos obstáculos, tras ocho años de esfuerzos continuos se han reunido las galerías de las vertientes norte y sur, y muy en breve recorrerán las locomotoras por un segundo punto las montañas alpinas (1).

Lo propio que en el monte Cenis, la fuerza natural utilizada para llevar á cabo tan gigantesca empresa se ha sacado de las corrientes vecinas á las dos bocas del túnel: por la parte de Airolo, del torrente Tremola y del Tessino, y por la de Göschenen, del Reuss. Las aguas de estos rios, recogidas en depósitos construidos á 180, 90 y 85 metros sobre los edificios que contenian las máquinas motrices ó turbinas y los compresores, bajaban por conductos metálicos hasta las máquinas y suministraban fuerza sobrada para que estas funcionaran continua y regularmente.

Véanse ahora los principales perfeccionamientos que se han introducido en la perforacion del nuevo túnel.

Hemos dicho ántes que los ingenieros del monte Cenis no habian tardado en sustituir á los arietes ó compresores de columna de agua los compresores de émbolo líquido, de los que hemos procurado dar una idea. El motivo de esta sustitucion era muy natural: estas últimas máquinas producian triple aire comprimido que los arietes, costando una tercera parte ménos.

Con todo, no dejaban de tener grandes defectos: como los émbolos líquidos habian de mover una masa de agua considerable, debian funcionar con gran lentitud á fin de economizar la fuerza motriz, y de aquí la necesidad de usar ruedas hidráulicas de pausado movimiento. Además estos compresores eran dispendiosos y ocupaban mucho espacio. En las montañas cuyas corrientes son poco caudalosas, pero cuya escasez de agua está compensada por las grandes alturas de sus saltos, es más ventajoso el uso de motores rápidos como las turbinas; pero esta ventaja desaparece con los compresores de émbolo líquido, por cuanto es necesario trasformar por medio de sistemas de engranajes el movimiento rápido en otro más lento. Se ha logrado obviar este inconveniente merced al empleo de nuevas bombas de compresion ideadas hacia ya tiempo por M. Colladon, pero perfeccionadas recientemente por este distinguido ingeniero, y adaptadas al uso especial que reclamaba la perforacion del túnel del San Gotardo.

Las máquinas motoras usadas eran turbinas, cada una de las cuales ponia en movimiento un árbol de tres bielas que hacian funcionar los émbolos de tres cilindros compresores. A cada vaiven del émbolo, el aire era aspirado de una parte por el cilindro, y de la otra rechazado por ciertas válvulas de admision y de salida, y comprimido en seguida hasta siete ú ocho atmósferas. Los cilindros de doble pared y el vástago hueco del émbolo daban paso continuo al agua fria, para compensar así el calor desarrollado por la compresion, en el momento de la compresion misma, y con el mismo objeto, se inyectaba en el cilindro una corta cantidad de agua en estado pulverulento. Esta disposicion era de suma importancia para la conservacion de los órganos de la máquina. De los depósitos ó cilindros de hierro donde se almacenaba el aire comprimido, pasaba éste por tubos metálicos á la entrada del túnel, y luégo al interior hasta el sitio de la perforacion, donde mediante ciertos tubos de cautchuc iba á parar á las máquinas perforadoras. Tambien se han introducido gradualmente en estas algunos perfeccionamientos, gracias á los cuales se ha podido simplificar la operacion

(1) Esta vía férrea ha sido abierta á la circulacion el 21 de mayo de 1882. (*N. del T.*)

final, que consiste en la apertura de barrenos en la superficie tallada de la roca. Una vez abiertos los agujeros á la profundidad deseada, introducíanse en ellos cartuchos de dinamita, que con la explosion disgregaban la roca.

Ya hemos dicho ántes que el aire comprimido, despues de poner en movimiento el aparato perforador, servia para renovar el aire viciado en las galerías por la respiracion de los trabajadores, por la combustion de las lámparas y por el gas engendrado por cada explosion. Las perforadoras no hubieran bastado para suministrar el aire fresco y puro necesario para su renovacion; así fué que se pusieron llaves ó espitas en el conducto de aire, con las cuales se pudo remediar dicha insuficiencia, pues la cantidad del comprimido por las bombas excedia con mucho de la que se necesitaba para la perforacion.

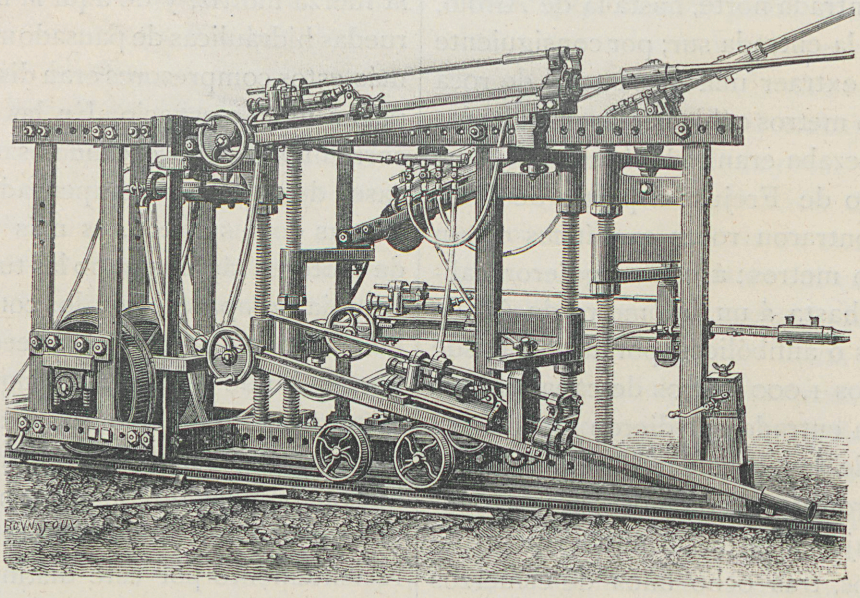


Fig. 230. —Nuevas máquinas perforadoras usadas en el túnel del San Gotardo

Finalmente, se ha utilizado tambien el aire comprimido en el San Gotardo para un uso no ménos importante. Una vez fraccionada la roca, era menester recoger y sacar los escombros del túnel, trabajo que naturalmente se hizo más pesado á medida que se penetraba más y más en las profundidades de la montaña. Para activar este acarreo, que diariamente llegaba á centenares de metros cúbicos, no podia pensarse en emplear el vapor; el hornillo de una locomotora habria aumentado la temperatura ya sobrado elevada y contribuido á viciar el aire de la galería. Tambien se recurrió para esto al medio en cuestion (fig. 232).

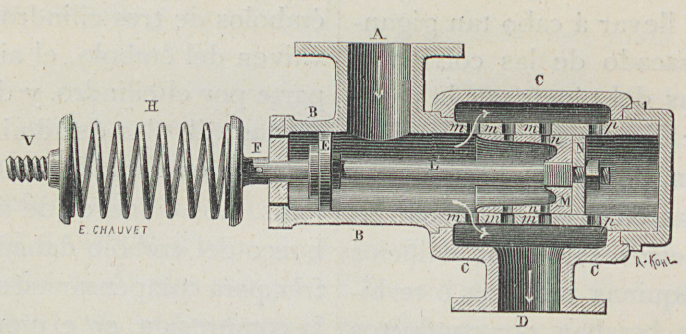


Fig. 231. —Regulador de la locomotora de aire comprimido

Al principio se sirvieron de locomotoras comunes, en las cuales se introdujo aire comprimido que hacia funcionar los distribuidores y los cilindros enteramente como el vapor mismo. Despues, como la cantidad de gas motor que se podia introducir en semejantes máquinas se consumia muy luégo, se agregó á la locomotora una especie de tender, compuesto de un gran depósito cilíndrico de aire comprimido, el cual

se comunicaba por un tubo con la caja de distribucion de la máquina; pero en breve se prefirió un sistema ménos molesto y embarazoso, y el ingeniero del túnel M. Ribout ideó é hizo construir una locomotora de forma especial, á la cual proveyó de un regulador á propósito para producir la salida del aire comprimido del tubo á una presion determinada y constante. La fig. 231 representa la seccion de este aparato. El aire comprimido entra por A en el cilindro B, en donde su presion es la del depósito: sale de aquí para pasar á la caja de distribucion por el tubo D con menor presion, porque su salida se efectúa por los orificios *m m* que re-

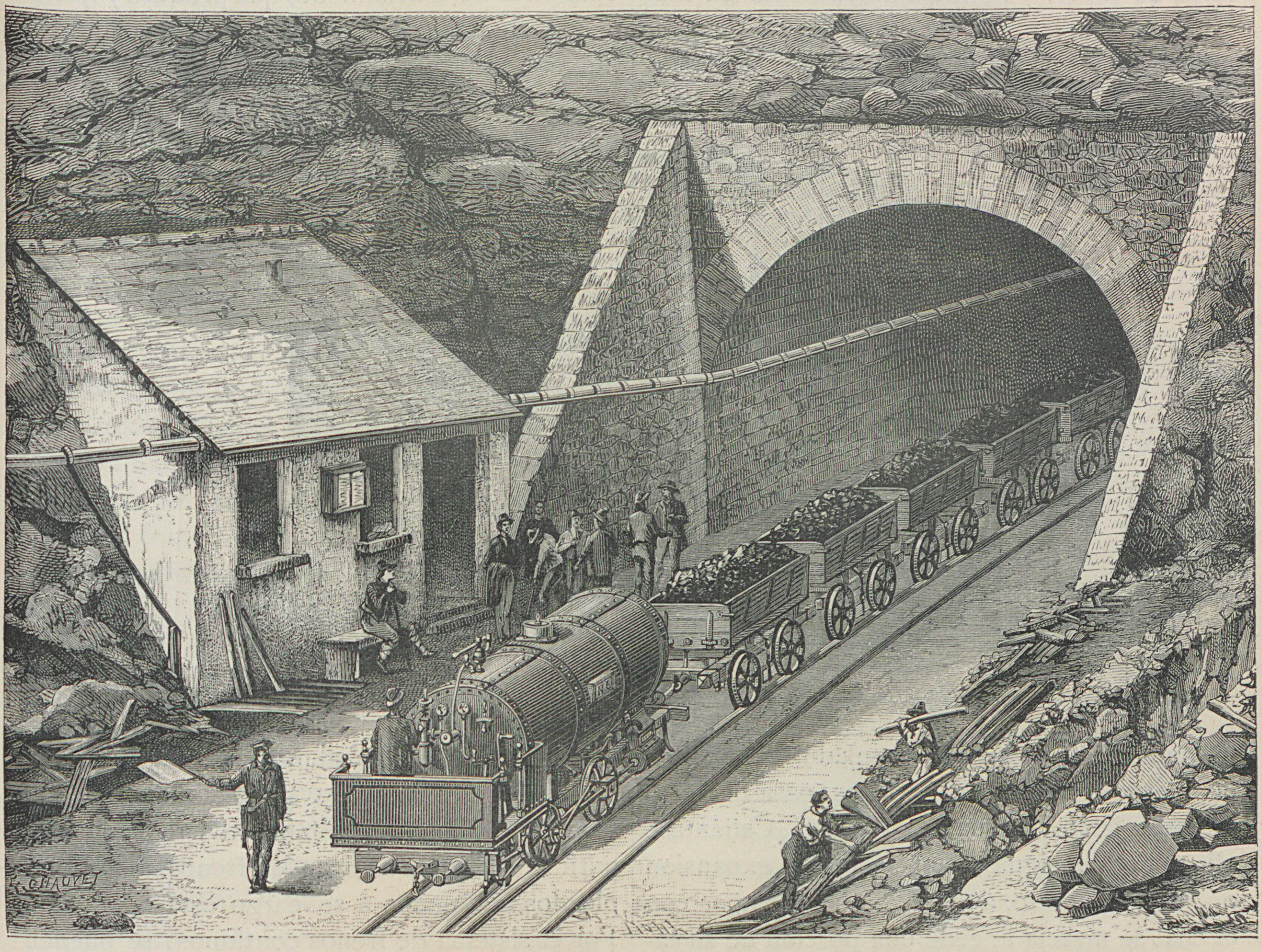


Fig. 232.—Túnel del San Gotardo: Locomotora de aire comprimido usada para la extraccion de escombros

ducen su cantidad. Trátase de hacer constante esta presion á la salida, áun cuando á la entrada sea variable, puesto que el consumo la ha disminuido forzosamente. Para ello, el cilindro B está provisto de un émbolo que se apoya por medio de un vástago exterior F en un muelle en espiral, cuya fuerza se regula con un tornillo. Por el otro lado, el émbolo lleva una pieza provista de aberturas *n n* que, segun su posicion, tapan ó destapan las aberturas *m* de admision del gas comprimido. Si la presion aumenta á la salida, el émbolo corre hácia la izquierda, y las aberturas *m* quedan cerradas en parte; la salida y por consiguiente la presion disminuyen; en el caso contrario, el émbolo se mueve hácia la derecha, el gas penetra en mayor cantidad, y la presion y la salida recobran su valor normal. Así pues, en virtud de este mecanismo automático queda asegurada la regulacion de la presion del aire introducido en la caja distribuidora.

VI

APLICACION DEL AIRE COMPRIMIDO Á LOS CARRUAJES DE LAS TRANVÍAS

La figura 233 representa un carruaje que ha funcionado en diciembre de 1875 en la tranvía que va desde la plaza de la Estrella hasta Cour-

bevoie. El motor de esta nueva máquina es tambien el aire comprimido. Vénse entre las ruedas dos depósitos cilíndricos; en estos cilindros, que son muy resistentes, una máquina fija instalada en las estaciones extremas comprime el aire á la presion de 25 atmósferas. Utilízase la fuerza elástica de este aire como en las locomotoras de vapor, y pone en movimiento un mecanismo semejante al de éstas. Lo que constituye la originalidad del ingeniero M. Mekarski es el aparato que tiene por objeto mantener á una presion constante el aire comprimido que sale de los depósitos. Este *regulador de presion* va colocado en la parte anterior del carruaje entre los cilindros motores. Tropezábase con una dificultad que afortunadamente parece allanada: la de obtener la expansion sin los inconvenientes del enfriamiento que produce y que al cubrir de hielo las paredes de los cilindros, hubiera entorpecido el mecanismo. A este efec-

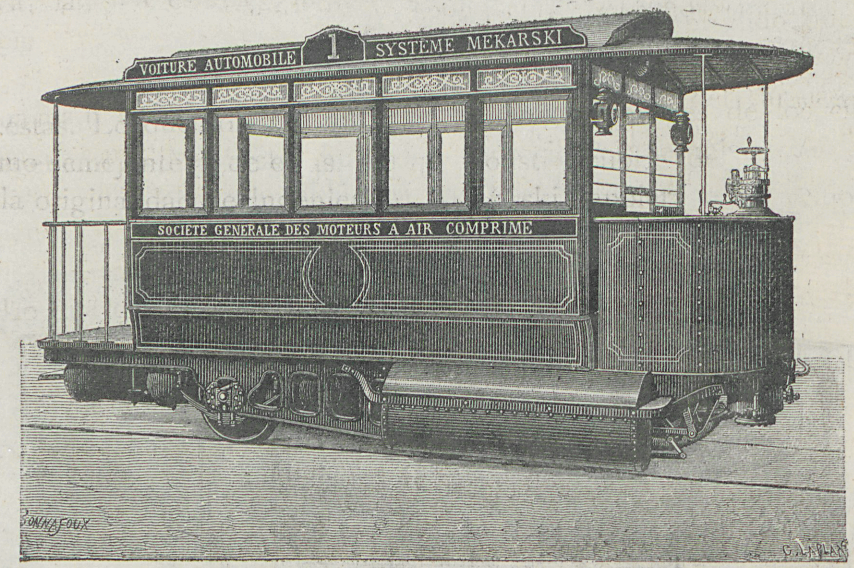


Fig. 233. —Carruaje automóvil de Mekarski movido por el aire comprimido

to, ántes de ir á parar al regulador de presion el aire que sale de los depósitos, pasa por otro depósito lleno de agua á 150° ó 170°. Caliéntase allí, y por consiguiente al efectuar la expansion no se enfria tanto, aparte de que el vapor con el cual se mezcla le cede una porcion de su calor latente.

Ninguna trepidacion, ningun ruido, un manejo muy fácil y gran regularidad en la marcha, tales son las cualidades principales del nuevo motor, que no tardará mucho en adoptarse, si la cuestion del precio de coste es favorable al nuevo sistema.

No debemos terminar sin hacer mencion de otra aplicacion importante del aire comprimido en las vías férreas, y es la que tiene por objeto enfrenar los wagones de un modo continuo y automático. En los sistemas de freno á mano, la maniobra es insegura, pues el maquinista al tropezar con un obstáculo imprevisto ha de trasmitir la órden de acortar los frenos á los empleados que tienen á su cargo esta operacion. Por el sistema de frenos continuos, se pueden enfrenar á la vez todos los carruajes, desde la locomotora y el tender hasta el último wagon. Los inventores han sacado la fuerza necesaria para ello, ya de la electricidad ó ya de la presion atmosférica ó del vacío, ó ya en fin del aire comprimido, habiéndose dado diferentes soluciones á tan interesante problema. Una de las más ventajosas es el freno Westinghouse, que funciona con aire comprimido. El ingenioso mecanismo que lo constituye es demasiado complicado para que podamos dar aquí una descripcion detallada de él.

CAPÍTULO VI

TELEGRAFÍA NEUMÁTICA.—RELOJERÍA NEUMÁTICA

I

PRIMEROS ENSAYOS DE ESTACION NEUMÁTICA

En el capítulo anterior hemos visto que desde principios de este siglo se ha tratado muchas veces de utilizar la presion del aire, ya para la circulacion de carruajes por las carreteras y ferrocarriles, ya para el acarreo de mercancías, paquetes ó cartas. Los inventores de este sistema, Medhurst y Wallance, tan sólo se valieron en un principio de la presion atmosférica: el ferro-carril atmosférico de Kingstown, y luégo el de San German, han demostrado que la idea era realizable, por más que el sistema, demasiado costoso y complicado, hiciese su aplicacion, ya que no imposible, por lo ménos muy poco económica.

Posteriormente, varios inventores han combinado la accion de la presion atmosférica ó del vacío con la del aire comprimido. Citaremos desde luégo, por órden de antigüedad, la estacion neumática (ó *pneumatic dispatch*) de Rammel, establecida en Lóndres en 1854, y cuya descripcion en principio es la siguiente.

En este sistema el tubo por donde marchan los wagoncillos que llevan los despachos forma un pequeño túnel de hierro de $0^{m},84$ de diámetro que tiene un par de rails en su parte inferior. Los wagones son cajas de hierro, de la misma forma exterior que la del túnel, con una separacion de unos $0^{m},03$ entre sus paredes y las del tubo. El aparato motor, al cual ha dado su inventor M. Rammel el nombre de *inyector neumático*, está instalado en una de las estaciones, y dispuesto de modo que produce sucesivamente, ora aire comprimido cuya fuerza motriz empuja por detrás á los wagones que van á la estacion opuesta, ó bien hace cierto grado de vacío ó de enrarecimiento del aire que ocasiona su regreso. Vése pues que no se utiliza tan sólo la presion atmosférica, sino tambien la fuerza almacenada de cierta cantidad de aire comprimido, es decir, condensado de modo que su presion sobrepuje á la de la misma atmósfera.

El *pneumatic dispatch* de Lóndres no funcionaba en su orígen sino en una distancia de 500 metros, entre la estacion de Euton y la de la administracion de correos de la calle de Eversholt.

Aquí podemos añadir algunas palabras acerca de ciertos ensayos de vías férreas, cuyos carruajes están movidos del mismo modo que los wagoncillos conductores de despachos del *pneumatic dispatch*.

Por ejemplo, M. Rammel ha realizado en Lóndres la idea concebida por Wallance, la cual consistia en hacer recorrer el interior del tubo neumático á todo un tren con sus diferentes carruajes, constituyendo así un émbolo gigantesco. Dicho físico construyó una línea de prueba en el parque de Sydenham. El primer carruaje del convoy lleva por delante un disco de diámetro poco menor que el del túnel, provisto en toda su circunferencia de un rodete ó cepillo que basta para interceptar lo suficiente el paso del aire. Así como en el tubo destinado al trasporte de despachos, el vacío sirve solamente para hacer que regrese el tren, al que durante el viaje de ida empuja el aire comprimido.

Tambien se construyó en 1870 en Nueva York un pequeño ferro-carril atmosférico de corta longitud, que iba desde Warren street á la extremidad ménos elevada de la Cité, junto al rio del Norte. El túnel, de forma cilíndrica, tiene en su parte inferior dos rails por los cuales corre un solo carruaje de viajeros, que tiene casi el mismo diámetro que el túnel, por cuyo interior circula empujado por la presion del aire. Las figuras 234 y 235 representan dicho camino atmosférico y el interior del wagon.

Las máquinas para poner en movimiento los trenes de tan singular camino de hierro son, por una parte, una máquina de vapor de la fuerza de 100 caballos, y por otra, una máquina insuflante puesta en accion por la primera y

capaz de lanzar al interior del túnel cerca de 3,000 metros cúbicos de aire por minuto. Por lo demás, el camino atmosférico de Nueva York lo propio que el de Sydenham, no pueden considerarse sino como ensayos, en que la curiosidad prevalece sobre la utilidad práctica.

Pasemos ahora á ocuparnos del sistema de telegrafía neumática de Paris, y demos ante todo una idea del modo cómo funcionaba en su orígen.

La primera comunicacion de este género se estableció entre las dos estaciones del Gran Hotel y de la plaza de la Bolsa. Un tubo de 1,100 metros de largo y 0m,065 de diámetro, enlazaba por cada uno de sus extremos dos cámaras que servian para introducir en el tubo ó para sacar de él el émbolo portador de los despachos (fig. 236). Este émbolo, de forma cilíndrica, consistia simplemente en una caja cerrada por un extremo, y provista en el otro de una tapadera de quita y pon (fig. 237): los despachos metidos en su correspondiente sobre, se coloca-

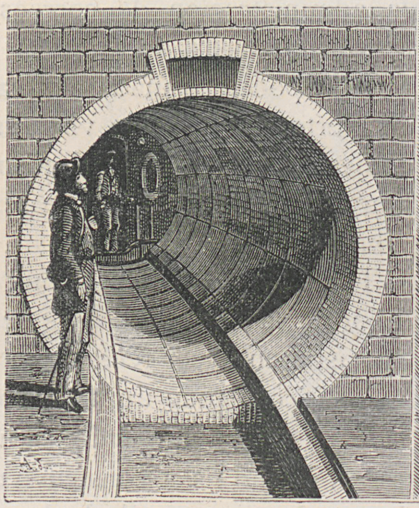


Fig. 234. — Ferro-carril atmosférico de Nueva York



Fig. 235. — Vista interior del wagon

ban en esta caja. Mediante una guarnicion de cuero se adaptaba el émbolo exactamente á las paredes del tubo, de modo que no daba paso al aire comprimido.

Cada cámara se podia poner á voluntad en comunicacion, por medio de dos llaves, ya con el aire exterior, si se habian de recibir los despachos, ó ya con el depósito de aire comprimido, si se trataba de expedir el émbolo conductor de ellos.

Comprimíase el aire de un modo tan sencillo como económico, mediante la presion del agua de los depósitos de la ciudad que, en cada una de las dos estaciones, equivalia á un salto de unos 15 metros de altura. A este efecto habia instaladas tres cubas de hierro cerca de cada estacion: una de ellas recibia el agua que, conforme la iba llenando, impelia el aire situado sobre el líquido y lo comprimia en las otras dos cubas. Vaciando la primera por una espita, poniendo su pared superior en comunicacion con el aire libre, y dando entrada en seguida al agua de las cañerías, se podia repetir indefinidamente la misma operacion y obtener en las otras dos cubas el aire comprimido á la presion necesaria. Tres minutos bastaban para conseguir este resultado, y el émbolo, empujado en el tubo por la fuerza del aire comprimido, llegaba al punto de su destino en 90 segundos, lo que equivale á una velocidad media de 12 metros por segundo.

La presion en realidad empleada no excedia de 1 atmósfera 3/4, y la capacidad de los depósitos de aire comprimido comparada con la del depósito de agua era tal, que al fin del trayecto la presion excedia aún de 1,20 atmósfera. En un principio, el aire comprimido era el único motor; mas en breve se introdujo en el sistema un perfeccionamiento importante. A cada maniobra se hizo servir la presion del agua, no tan sólo para comprimir el aire que impulsaba al émbolo portador de despachos, sino tambien para enrarecer dicho flúido y hacer regresar el émbolo al punto de partida.

Con esta instalacion sencillísima, se podian expedir trenes de despachos cada cuarto de hora, y áun cada 12 minutos al medio dia, en que son siempre más numerosos los telégramas.

La telegrafía neumática parisiense, limitada primeramente á un corto trayecto y á dos estaciones, ha tomado de dia en dia mayor incremento.

Ya en 1873 habia diez y siete estaciones de distrito, además de la central, situada en la calle Grenelle, cerca de la administracion telegráfica y de las oficinas de recepcion de todos los des-

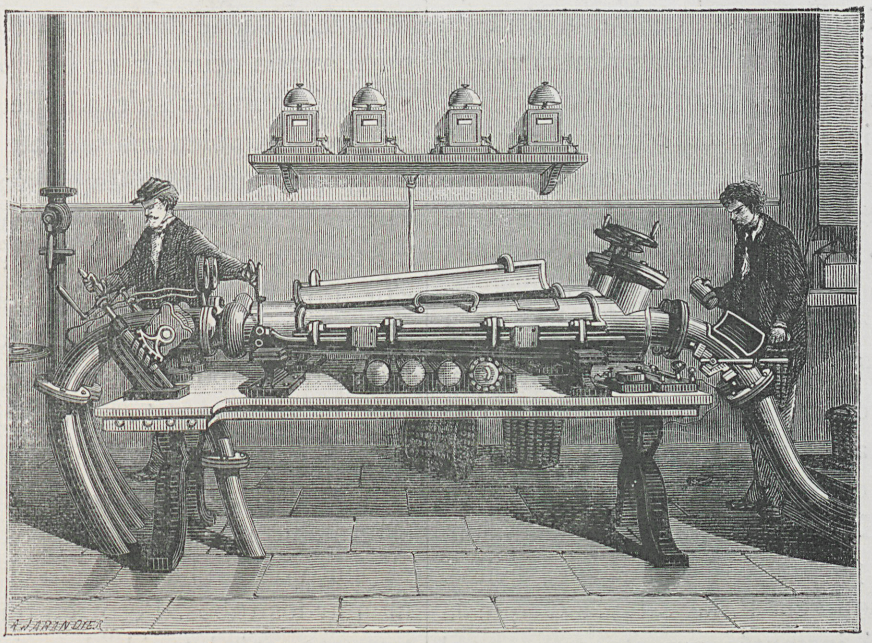


Fig. 236.—Antiguo aparato de trasmision y recepcion de despachos de la estacion neumática de Paris

pachos. Hoy dia el servicio ha adquirido tanta importancia que ha sido menester modificar las máquinas y los aparatos y, mediante ciertos perfeccionamientos, ponerlos en estado de satisfacer las crecientes exigencias de la distribucion de telégramas en la gran ciudad.

Así pues, al sistema hidráulico del que acabamos de hablar, se ha sustituido la fuerza del vapor, más expedita y más económica á la vez. Los aparatos de trasmision y recepcion se han perfeccionado tambien de varios modos. Vamos á describir sucintamente unos y otros, con el auxilio de las figuras 238 y 239, que representan la instalacion actual de la estacion central.

En la primera de dichas figuras, se ve en AA la máquina motriz de vapor que trasmite el movimiento por la correa BB al sistema de bombas de compresion y de enrarecimiento del aire. El volante C lleva dos excéntricas D y D', en las cuales se articulan dos sistemas de bielas, *b b'* por una parte, y *b'' b'''* por otra. Las dos primeras bielas mueven simultáneamente los émbolos de los cilindros F y F' que constituyen con ellas una bomba de compresion de doble efecto, pues F' aspira en I el aire de la atmósfera, lo envia á F y desde allí, por el tubo HHH', al depósito J que se ve bajo el pavimento de los aparatos en el segundo grabado. El otro sistema de bielas *b'' b'''* pone en movimiento los émbolos de los cilindros G G'; pero el juego de las

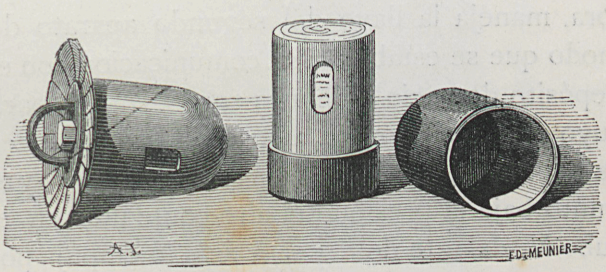


Fig. 237.—Embolo y caja de despachos de la estacion neumática

válvulas en estos cilindros es precisamente inverso del de las válvulas de los cilindros F F'; más claro: al paso que estos hacen las veces de bomba de compresion, los otros producen el vacío por los tubos SSS' en un segundo depósito J', situado junto al de aire comprimido.

Si se han comprendido bien todas estas operaciones opuestas, es decir, la de la produccion del aire comprimido y la del enrarecimiento del aire en dos depósitos separados, con la misma

facilidad se comprenderán las que tienen por objeto la trasmision ó recepcion de un grupo de despachos. Para esto consideremos la figura 239.

Describamos ante todo el modo de trasmision.

Supongamos que se trata de expedir una caja de despachos de la estacion central á otra de distrito con la cual comunica la primera por el tubo de canalizacion Q. Este tubo va á parar, como se ve, al interior de una columna vertical, en la que se introduce la caja N con la mano por una puertecilla practicada á conveniente altura, estando sostenida al principio por una valvulita O, que se puede acercar ó separar con la manivela P.

Para expedirla, se empieza por dar vuelta al volante M, el cual pone en movimiento una llave adaptada á L; ábrese esta llave, y al punto penetra el aire comprimido del depósito J, por los tubos KKK', en el aparato de trasmision, impeliendo allí por detrás la caja de despachos. Retirando la manivela P, la válvula O que la detiene, baja, é instantáneamente se pone el tren en marcha.

Veamos ahora cómo se efectúa su recepcion. Ante todo debemos decir que todas las estaciones están enlazadas con la central por una comunicacion eléctrica. En el momento de la trasmision, el empleado la anuncia haciendo sonar un timbre; el que se halla en la estacion receptora, maneja la llave del segundo aparato de modo que se establezca la comunicacion con el depósito de vacío ó de aire enrarecido J', para cuyo objeto sirven los tubos TTT'. Entónces se baja la manivela que abre la válvula O', y al punto baja la presion del aire contenido en el tubo V, delante del tren. A éste lo empuja por un lado el aire comprimido; por otro, la resistencia ha disminuido, y la caja de despachos va á parar al fondo de la pequeña cámara X, donde un ruido seco indica además su llegada. Ciérrase la válvula O', se abre la puerta Y, y se extrae la caja.

Despues de cada operacion se restablece la comunicacion entre los aparatos y los tubos de comunicacion con la atmósfera; los tubos ZZ' provistos de una llave sirven para establecer ésta comunicacion.

Réstanos decir una palabra acerca del modo cómo se remedian ciertos inconvenientes que pueden resultar, y que resultan efectivamente, aunque rara vez. Nos referimos especialmente al caso en que una caja de despachos, en lugar de recorrer toda la distancia comprendida entre la estacion expedidora y la receptora, se detuviera en cualquier punto de la canalizacion subterránea. Puede dimanar este percance de alguna avería ocurrida en el tubo, por ejemplo, en las junturas, resultando de aquí un escape de aire, ó tambien una saliente ó desnivel puede detener alguna caja de despachos, cosa muy rara, gracias al cuidado con que se ensamblan los tubos y al pulimento de su superficie interior. Por último, lo más frecuente es que una de dichas cajas se abra ó que se disloque la guarnicion del émbolo. En estos casos, se empieza por apelar en una ú otra estacion, ó en las dos sucesivamente, á la accion del aire comprimido que pueda bastar para salvar el obstáculo. Si este medio no da resultado, es preciso registrar el punto donde ha ocurrido el percance y desmontar los tubos. Pero ¿en qué sitio exacto del trayecto está detenida la caja? Para resolver este problema, se mide la presion interior del tubo detrás de la caja, y se la compara con la presion en el momento de la partida. La diferencia hallada procede evidentemente del aumento de volúmen que ha experimentado el aire comprimido á causa del movimiento de avance de la caja, desde la estacion hasta el punto de interrupcion.

Se ha propuesto un medio más preciso, que consiste en emitir un sonido intenso, por ejemplo, un pistoletazo en la abertura del tubo de canalizacion, y en contar el número de segundos que trascurren entre el sonido primitivo y el que vuelve al punto de partida á consecuencia de la reflexion en la cara posterior de la caja. Este espacio de tiempo es doble del que necesita una onda sonora para recorrer la distancia buscada. Mas para que este medio tenga alguna precision, es menester que un aparato especial de anotacion gráfica marque en un cilindro los segundos y fracciones de segundo por una parte, así como las idas y venidas (por reflexion) de la onda sonora. No sabemos que se haya aplicado en realidad este ingenioso procedimiento.

Hasta ahora no se ha adoptado la telegrafía

neumática más que en los grandes centros de poblacion, en ciudades como Lóndres, Paris, Berlin y Viena. Tan sólo se la usa para la distribucion de despachos ó cartas en una red de corta extension, entre estaciones distantes por ejemplo dos kilómetros. El motivo que impide

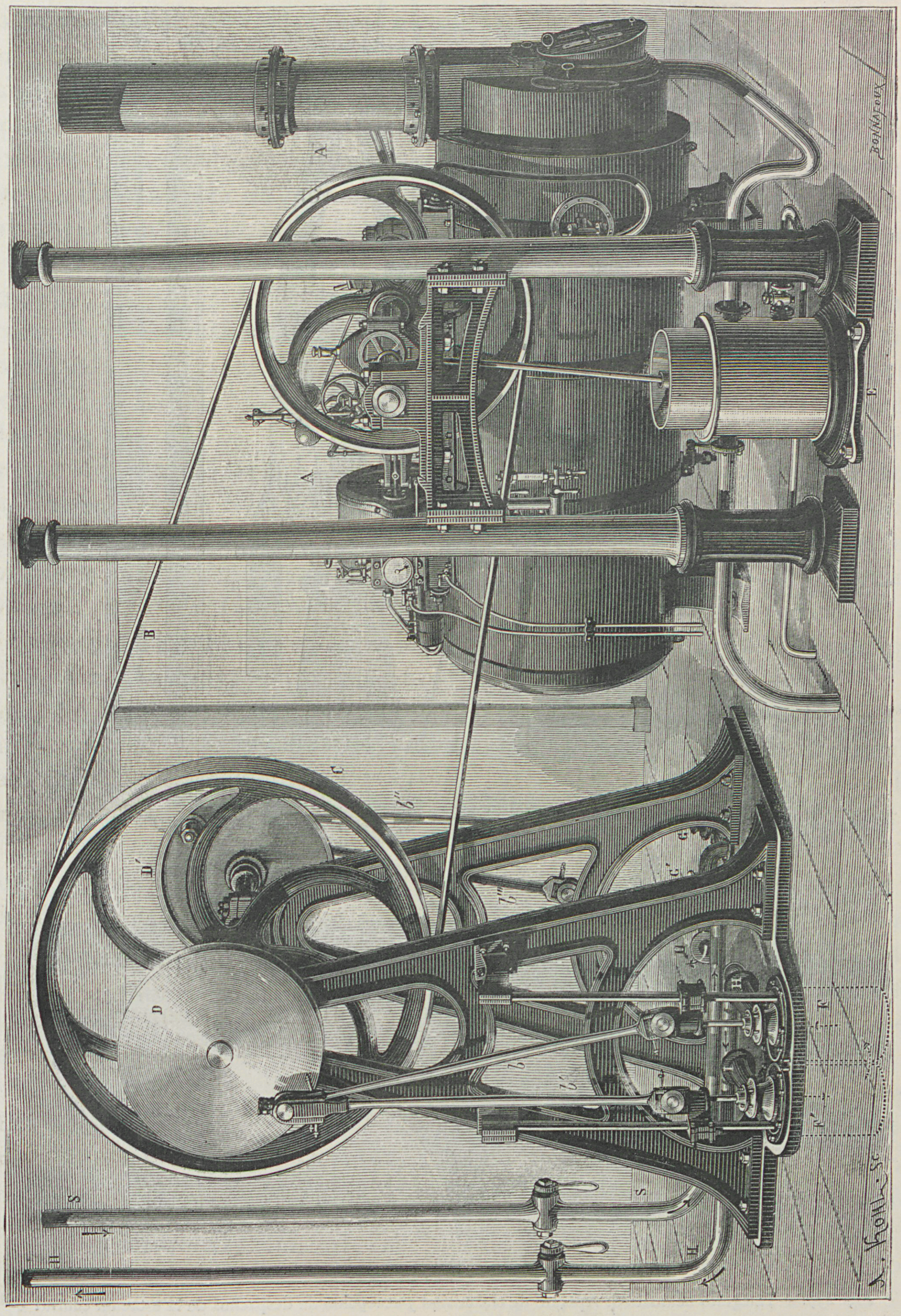


Fig. 238.—Telégrafo neumático: Bombas de compresion y máquina de vapor de la estacion central

valerse de este sistema de trasporte á mayores distancias, como de una ciudad á otra, no consiste solamente en la escasez del tráfico postal, sino principalmente en las leyes de variacion de los gases comprimidos en tubos, segun su longitud y diámetro. Estando la velocidad en razon inversa de la raíz cuadrada de las longitudes de los tubos de igual seccion, admitamos que las cajas circulen por un tubo de 1,000 metros con una velocidad de 20 metros por segundo, á la presion de una atmósfera; en un tubo de 10 kilómetros dicha velocidad no será más que de unos 6 metros, y en otro de 20 kilómetros, no pasará de $4^{m},50$.

Con objeto de remediar este inconveniente, los ingenieros franceses Crespin y Lapergue han ideado un sistema especial, que consiste en establecer *relevadores* en la línea de mayor longitud. En este sistema, además de la canalizacion por cuyo interior circularian las cajas de

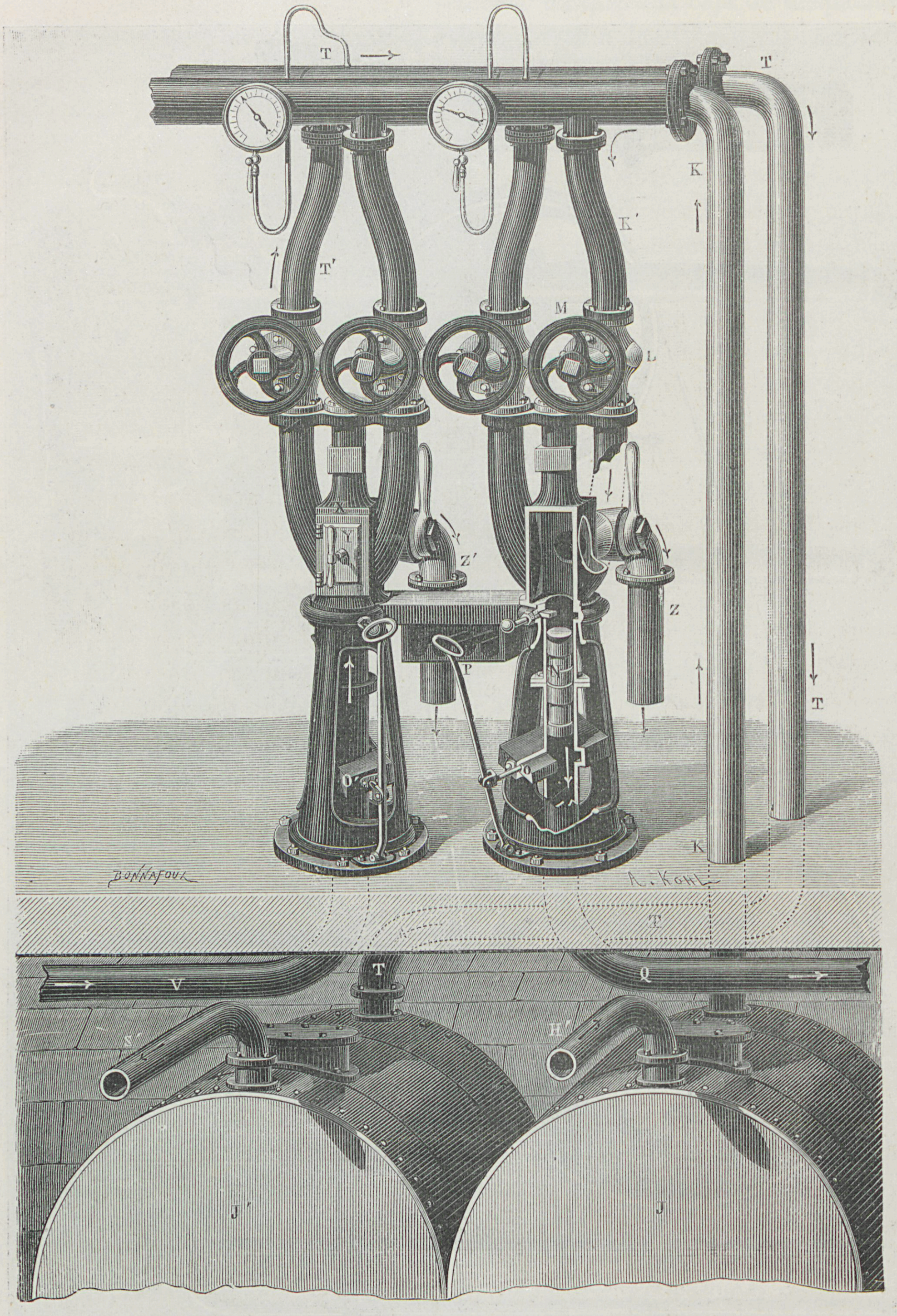


Fig. 239.—Telégrafo neumático: Aparato de trasmision y recepcion de despachos de la estacion central

despachos, habria dos comunicaciones laterales secundarias con los depósitos de vacío y de presion destinados á alimentar los relevadores situados en el trayecto en sitios convenientes. Estos relevadores deberian distar 5 kilómetros uno de otro para producir el vacío en la línea, y tan sólo un kilómetro para producir la presion. Un mecanismo funcionaria automáticamente en cada relevador, al paso de cada caja, cerrando la seccion recorrida, haciendo en ella el vacío, é introduciendo por el contrario aire en la seccion en que la caja acabase de penetrar, y suministrando por último la presion necesaria para hacerla recorrer la seccion siguiente.

II

RELOJES NEUMÁTICOS

La idea de distribuir con uniformidad la hora en todos los barrios de una ciudad no es nueva. Para ello debia apelarse, como en efecto se apeló desde luégo, á la electricidad, á las corrientes que se propagan, interrumpen ó restablecen, por decirlo así, instantáneamente, por los diferentes puntos de una línea de hilos conductores. Los sistemas inventados con tal objeto son muchos. En el tomo del MUNDO FISICO que ha de tratar de la *Electricidad* describiremos los más importantes y las aplicaciones que de ellos se han hecho con buen resultado y en varias épocas en Paris, Lyon, Marsella, Bruselas, Gante, Leipzig, etc.

El sistema más sencillo de trasmision de la hora consiste en enlazar telegráficamente un reloj tipo, que marca el tiempo con toda la precision posible, con las esferas de los relojes de barrio, y en trasmitir mecánicamente el movimiento periódico del primero al mecanismo de los otros; entónces se da á estos últimos el nombre de *contadores electro-cronométricos*. Pero si, en vez de la electricidad y de la fuerza viva de las corrientes, se emplea otro motor, el aire comprimido, por ejemplo, para distribuir la hora del reloj tipo, tendremos los *relojes neumáticos*.

Pronto hará cuatro años que funciona en Viena un sistema de esta última clase distribuyendo la hora entre la Bolsa, el palacio imperial, la administracion de correos, la de telégrafos y las escuelas. En la sala de máquinas de la seccion austro-húngara de la Exposicion universal de 1878, estuvo expuesto un modelo de los aparatos de este sistema, cuyos inventores son los ingenieros austriacos Popp y Resch. Ultimamente, á principios del año 1880, la *Sociedad de relojes neumáticos* ha instalado en Paris una red distribuidora de la hora en varios puntos de las plazas y bulevares, y tambien á domicilio.

La descripcion de los relojes neumáticos admite la misma subdivision que la de la estacion atmosférica; primeramente tenemos el aire comprimido, luégo los aparatos de la estacion ó fábrica central que en este caso son, además de las máquinas de compresion, el reloj normal ó director y el mecanismo de distribucion, y por último, los relojes secundarios ó receptores y las cañerías que ponen en comunicacion al primero con los segundos.

Describamos sucesivamente estas diferentes partes del sistema.

Una máquina de vapor pone en movimiento las bombas de aire ó de compresion; no creemos necesario describirlas, por cuanto son bombas de doble efecto, que comprimen y almacenan el aire en grandes cilindros ó depósitos llamados *depósitos de alta presion*, porque la presion es de muchas atmósferas, con objeto de irlo suministrando para el consumo necesario, áun cuando la presion adoptada para el envío del aire á la cañería no exceda de siete décimos de atmósfera. Desde estos primeros recipientes pasa el flúido á un *depósito distribuidor*. Allí, gracias á un aparato regulador especial, constituido por una columna de mercurio que á cada momento debe equilibrar la fuerza elástica del aire interior, las pérdidas de presion que proceden del consumo se reparan á cada minuto, y por lo tanto la presion es siempre constante en el depósito distribuidor.

La máquina de vapor, las bombas de compresion, los depósitos de alta presion, el depósito distribuidor, toda esta parte del sistema está instalada en el taller central, cerca del reloj tipo ó distribuidor.

El movimiento de este reloj se compone de dos movimientos distintos: el primero, que no hay lugar á describir aquí, y que se ve en parte á la izquierda de la fig. 241, consiste en las ruedas comunes de los reguladores de péndulo; el segundo, enlazado con el primero, produce por intermedio de una excéntrica, y precisamente al principio de cada minuto señalado por la aguja de un pequeño cuadrante superior, un efecto de dislocacion que hace que se abra la caja de distribucion. En este momento, el aire comprimido llega del depósito distribuidor por el tubo J (fig. 240), pasa á la caja B y va á parar á las cañerías NN. Una parte del gas comprimido pasa al tubo AAA', de allí á los cilindros C (fig. 241), y levanta los émbolos de modo que comunica su movimiento, por un sistema de palancas y engranajes, á las pesas motoras del aparato de relojería; por consiguiente, éste se levanta automáticamente cada minuto.

Una de las tres aberturas de la caja de dis-

tribucion, la de la izquierda, pone constantemente la caja B en comunicacion con el aire de presion constante del depósito distribuidor; la de la derecha, se pone al principio de cada minuto y durante 15 ó 20 segundos, en comunicacion con la misma caja, enviando el aire comprimido á la red (la caja de distribucion ocupa entónces la posicion R de la figura); pero toma en seguida la posicion marcada con una línea de puntos, y en este caso la comunicacion cesa, al paso que por la abertura del medio en K, la red comunica con la atmósfera.

Así pues, cada minuto, ó hablando con más propiedad, al sexagésimo segundo de cada minuto marcado por el reloj tipo, pasa el aire comprimido á toda la red; al terminar un número de segundos que depende de la longitud de esta red y que se determina prácticamente, el aire comprimido se escapa al aire libre, y en el mismo trayecto la presion atmosférica sustituye á la del depósito distribuidor.

Antes de separarnos del taller central, del reloj tipo y del mecanismo distribuidor, añadiremos que en la prevision de averías posibles

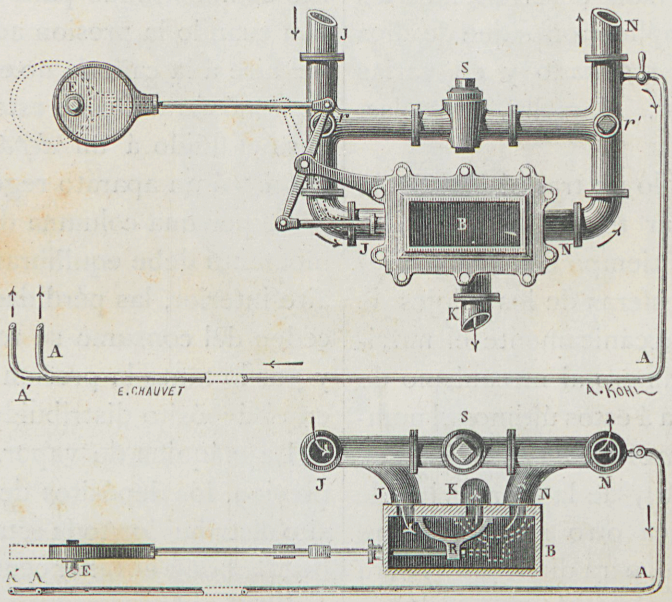


Fig. 240. — Distribuidor del aire comprimido para la trasmision de la hora

y de ciertas reparaciones que pueden hacerse indispensables en los órganos de varios aparatos, estos tienen siempre otros de repuesto, preparados para reemplazar á los que amenazan pararse. Por esto, un motor de gas, que no necesita tiempo alguno para tener la suficiente presion, puede sustituir á todo momento á la máquina de vapor que hace funcionar las bombas de compresion.

Por lo que hace al aparato distribuidor, vése que lleva sobre él un conducto suplementario *r* S *r*, merced al cual y á las llaves de dos y tres conductos *r*, S, *r'*, se puede abrir ó cerrar la comunicacion con el depósito distribuidor por una parte, y con la red por otra. En caso de que faltara el reloj tipo y áun el reloj de reserva, el empleado siempre presente, podria suplir la accion del reloj y de la caja de distribucion, moviendo á cada minuto la llave S.

Así pues, todo parece previsto de suerte que el servicio no sufra interrupcion alguna salvo el caso de avería grave y de fuerza mayor, y todas estas condiciones son indispensables para el buen éxito de una empresa de semejante naturaleza.

Réstanos decir cómo actúa el aire comprimido en los relojes ó cuadrantes distribuidos en la red, ya en la vía pública, ó ya en las casas ó establecimientos particulares. En la fig. 243 que representa la vista exterior de un reloj receptor de los bulevares, no se ve nada del mecanismo de dicha trasmision. Este mecanismo es muy sencillo, como se comprenderá examinando las figs. 242 y 244.

Del taller central parten tubos de hierro ó de plomo, de un diámetro que varía entre 27 y 30 milímetros, que irradian por debajo de tierra hácia todos los puntos que se han de servir; habiendo ramales enlazados con la línea general delante de un punto en que hay instalado

un reloj receptor; un tubo de cautchuc conduce el flúido motor hasta este reloj, penetrando en él por el cilindro Y y por su base inferior en el interior del fuelle S. La llegada del aire comprimido dilata este fuelle y hace subir el vástago T. Al elevarse este vástago levanta la palanca L articulada en A, y por consiguiente el apéndice *r*, el cual hace que recorra una division la rueda dentada R, en cuyo eje está fijo el minutero del reloj. Siendo 60 el número de dientes de dicha rueda, la saeta adelanta una division, es decir, un minuto. Por medio de otra rueda, se comunica el movimiento al horario.

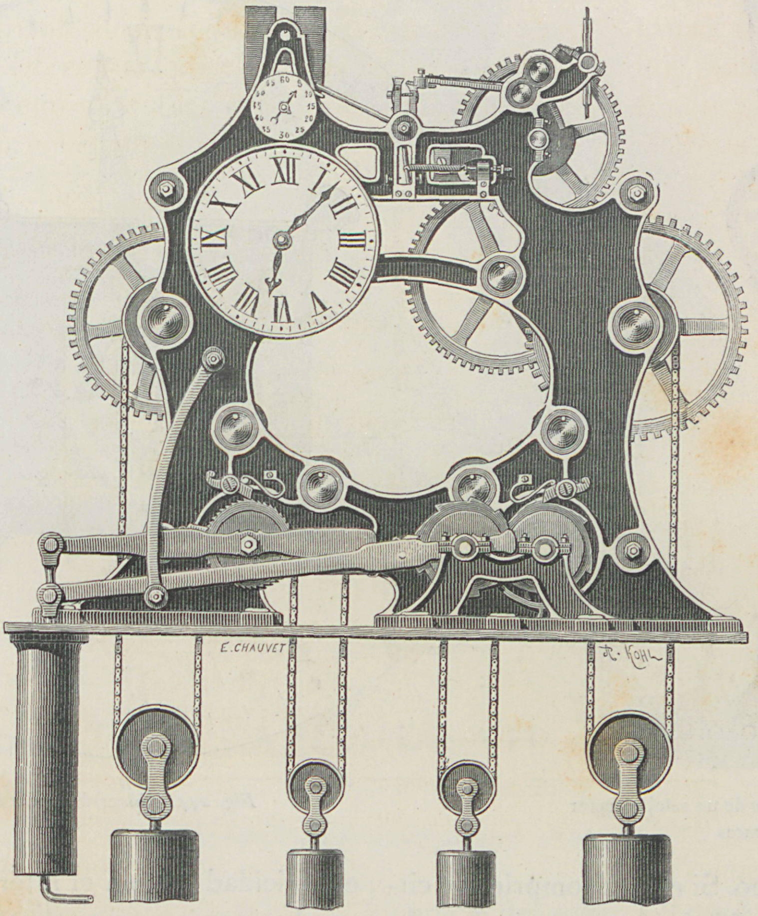


Fig. 241.—Distribucion de la hora por medio del aire comprimido. Reloj tipo de la fábrica central

En la fig. 244 se ve una pieza *t* situada sobre la palanca, un poco á la izquierda del vástago del fuelle, cuya pieza tiene por objeto impedir que el apéndice *r* deje girar á la rueda más de un diente en el caso en que la oleada de aire comprimido fuese demasiado fuerte. Otro apéndice *r'* impide que la rueda vuelva sobre sí misma cuando se ha efectuado el movimiento de avance.

El reloj normal está en comunicacion eléctrica con el Observatorio; por lo tanto debe marchar con toda la precision apetecible, y distribuir la hora con tanta exactitud como él la recibe. Pero ¿con qué precision?

Para responder á esta pregunta, hay que observar ante todo que los relojes receptores no pueden marcar más que minutos, y no segundos y mucho ménos fracciones de segundo. Si,

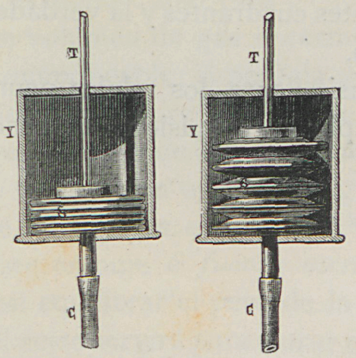


Fig. 242.—Accion del aire comprimido

valiéndose de un mecanismo más complicado, se intentara resolver el problema por lo que respecta á los segundos, es indudable que no

se conseguiria: el gas comprimido no circularia con la regularidad necesaria por tubos de cierta longitud. Lo importante y lo que es suficiente en la práctica, es que los relojes receptores estén arreglados al minuto con respecto á un reloj exacto, y que no adelanten ni atrasen.

Tambien se puede plantear de otro modo la cuestion de la precision de los relojes neumáticos. Suponiendo que la canalizacion se extienda á 1, 2 ó 3 kilómetros alrededor del taller central, ¿todos los relojes receptores andarán simultáneamente? ¿Marcarán el mismo minuto?

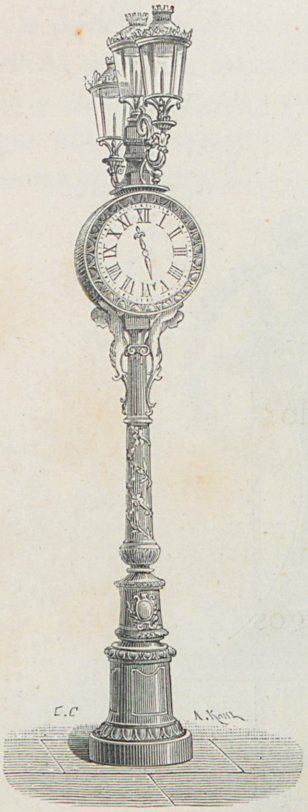


Fig. 243. — Vista exterior de un reloj receptor de los bulevares

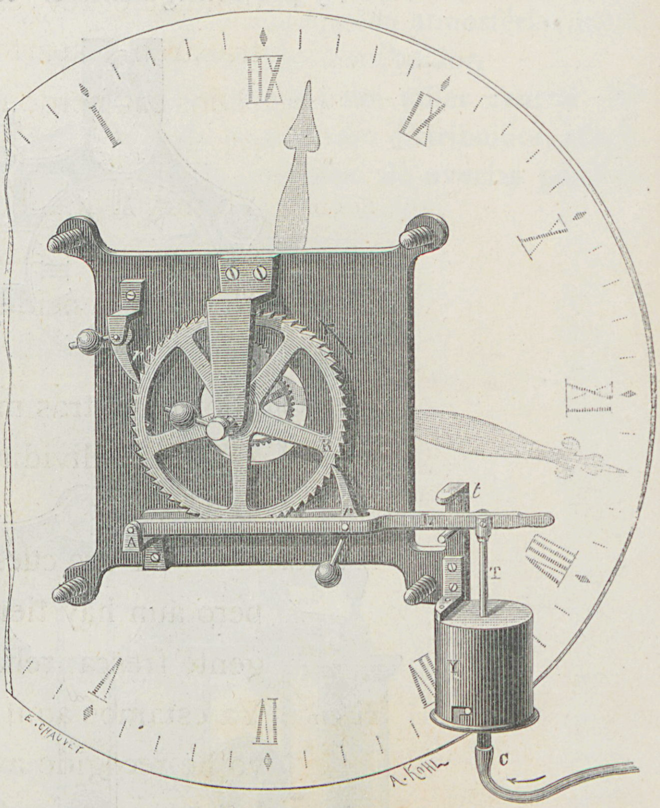


Fig. 244. — Mecanismo del reloj receptor

Seguramente que no. Si el aire comprimido circulara con una velocidad de 20 metros por segundo, necesitaria 50 segundos para trasmitir su presion á 1 kilómetro, y 100, 150 segundos á 2 y 3 kilómetros. Así es que puede haber uno, dos ó tres minutos de diferencia entre las horas de diferentes cuadrantes y la verdadera del Observatorio.

Por consiguiente, los relojes neumáticos no podrán suplir la trasmision de la hora por la electricidad que en el interior de una ciudad la puede marcar con una exactitud de una pequeña fraccion de segundo. Mas para los usos sociales no se requiere tan absoluta precision. La regularidad, la constancia, la uniformidad de la hora con uno ó dos minutos de diferencia, y sobre todo la baratura que resulta de la sencillez de los aparatos, son las cualidades que dan verdadera importancia á esta nueva aplicacion del aire comprimido.

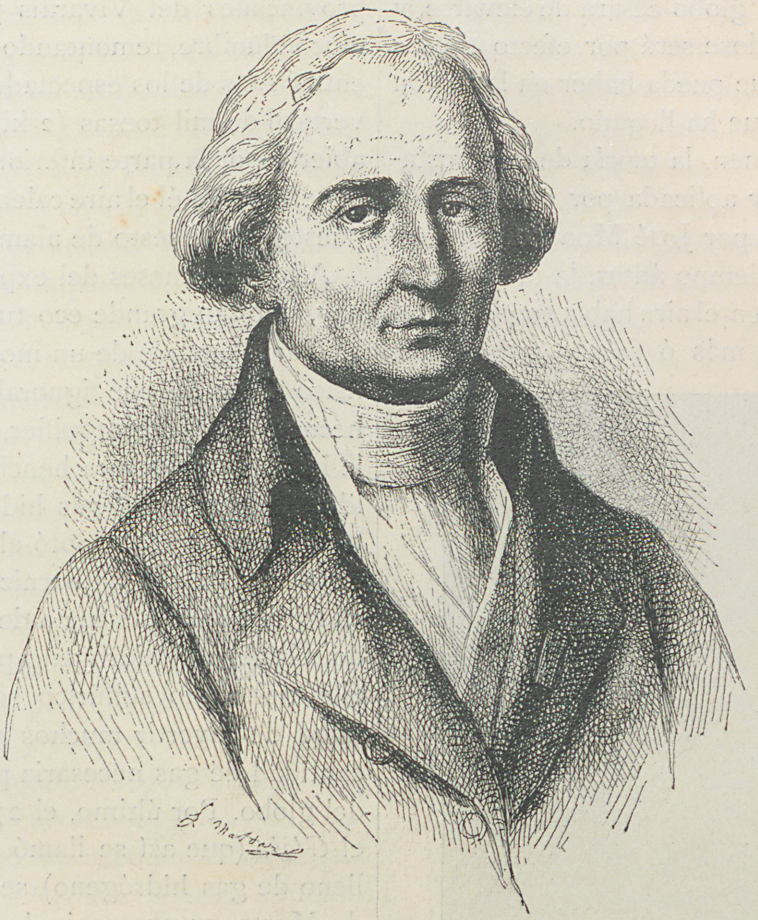


Fig. 245. — Montgolfier

CAPÍTULO VII

LOS GLOBOS. — LA NAVEGACION AÉREA

I

APLICACION DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMIDES Á LA ASCENSION VERTICAL DE LOS CUERPOS EN LA ATMÓSFERA

Todo cuerpo sumergido en un flúido pierde una parte de su peso igual al del flúido desalojado. Este principio, cuyo descubrimiento se remonta á Arquímedes, como es sabido, se puede aplicar á los gases lo propio que á los líquidos, y hé aquí por qué muchos cuerpos leves, como el humo, los vapores, las nubes, etc., se elevan y quedan suspendidos en el aire en vez de precipitarse á la superficie del suelo, como se precipitarian en un planeta que careciese de envolvente gaseosa ó atmósfera.

Para que tenga efecto esta ascension, basta que la ligereza específica del cuerpo sea menor que la de la porcion de aire en el cual está sumergido. El aire pesa 1 kil. 29 gramos á la superficie del suelo, á 0 grados de temperatura y con una presion de $0^{m},79$, es decir, que el peso de un metro cúbico de aire es entónces de $1^{k},29$. En las mismas circunstancias físicas, un metro cúbico de gas hidrógeno tiene una densidad quince veces menor: sólo pesa $0^{kil},09$. Supongamos este volúmen de gas encerrado en una envoltura impermeable; la pérdida de peso que experimentará en el aire será $1^{k},29$, y como el peso del gas no pasa de $0^{kil.},09$, será levantado en sentido vertical con una fuerza igual á la diferencia de estos pesos, esto es, de $1^{kil},19$. Una parte de este empuje ó *fuerza ascensional* se empleará en equilibrar el peso de la envoltura sólida, y el resto servirá para elevar el conjunto á cierta altura en la atmósfera. Como las capas de ésta tienen una densidad que disminuye con la altura, la fuerza ascensional irá disminuyendo progresivamente hasta que resulte nula. Al lle-

gar á este punto, el globo cesará de elevarse, y si continúa moviéndose será por efecto de las corrientes aéreas que pueda haber en la region de la atmósfera á que ha llegado.

Esta es, en resúmen, la teoría de la aerostacion, comprendida y aplicada por primera vez con éxito, en 1783, por José Montgolfier. Verdad es que mucho tiempo ántes, la idea de elevarse y sostenerse en el aire habia sugerido numerosos proyectos más ó ménos quiméricos,

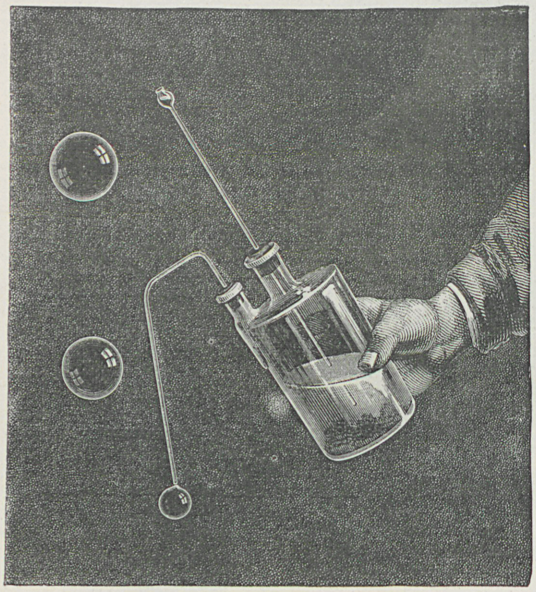


Fig. 246. — Ascencion de las burbujas de jabon henchidas de gas hidrógeno

que en su mayoría solo existieron en la imaginacion de sus autores; y sus escasas tentativas de realizacion fracasaron por no conocerse bien las leyes de la mecánica y de la física.

José Montgolfier, que probablemente conoceria los experimentos de Black, Cavendish y Cavallo sobre la ascension de las vejigas y burbujas de jabon henchidas de gas hidrógeno (fig. 246), concibió la idea de imitar en grande escala dichos experimentos y de utilizarlos para explorar las regiones atmosféricas. Primeramente hizo globos de seda ó de papel que, llenos de hidrógeno, se remontaron hasta cierta altura, tal como habia previsto, si bien para caer al poco rato, pues el gas se escapaba á través de su envoltura permeable. Entónces sustituyó al hidrógeno el aire caliente, cuya densidad, mucho mayor que la de este gas, es todavía menor que la del aire frio exterior, y cuya produccion es más fácil y económica. El 5 de julio de 1783, hizo Montgolfier en Annonay su primer experimento en grande escala ante los diputados provinciales del Vivarais y una considerable muchedumbre, remontando, entre los aplausos entusiastas de los espectadores y á una altura vertical de mil toesas (2 kilómetros), un globo abierto por la parte inferior, por cuya abertura penetraba en él el aire calentado por un brasero puesto en un cesto de alambre.

A los tres meses del experimento de Annonay, que tan grande eco tuvo, se le reprodujo en Paris, aunque de un modo algo distinto. El físico Charles, que ignoraba, por no haberla hecho pública Montgolfier, la clase de gas que le habia servido para henchir su globo, tuvo la idea de valerse del gas hidrógeno. Para construir la envoltura adoptó el tafetan, haciéndolo impermeable con un barniz compuesto de cautchuc disuelto en esencia de trementina hirviendo. Obtenia el hidrógeno por medio de la reaccion del ácido sulfúrico sobre el hierro; mas hubo de invertir muchos dias en producir la cantidad de gas necesaria para el henchimiento del globo. Por último, el 27 de agosto de 1783, el *Globo* (que así se llamó el primer aerostato lleno de gas hidrógeno) se elevó en el campo de Marte, en presencia de una inmensa multitud y fué á caer á los tres cuartos de hora en Gonesse, cerca de Paris. Del primer empuje subió á una altura vertical de unos 1,000 metros, y luégo desapareció oculto tras una nube para reaparecer durante un claro á mucha mayor altura y eclipsarse de nuevo entre las nubes.

No nos incumbe trazar la historia de las ascensiones aerostáticas, que se reprodujeron con mucha frecuencia á fines del siglo pasado y á principios del actual; pero hemos debido hacer mencion de los dos primeros experimentos, no tan sólo por la celebridad que alcanzaron y el entusiasmo que produjeron, sino tambien porque uno y otro caracterizan dos diferentes modos de ascension y dos sistemas de globos que se distinguen dando el nombre de *montgolfieras* á los globos llenos de aire caliente, y el de *aerostatos* á los henchidos de gas hidrógeno.

Tan brillante aplicacion de los principios de la hidrostática y de los nuevos descubrimientos en física y en química, recibió casi de golpe todo su desarrollo, por más que áun hoy dia estemos todavía muy léjos de haber sacado de ella todo el partido posible.

Tanto Montgolfier como Charles se conten-

taron en sus primeros experimentos con remontar los globos solos; pero no tardó en ponerse en práctica la idea de utilizarlos para llevar consigo viajeros que explorasen las regiones atmosféricas. Y en efecto, el primer viaje aéreo se realizó en el mismo año 1783. El 21 de noviembre, un jóven naturalista y físico llamado Pilâtre de Rozier, acompañado del marqués de Arlandes, despues de hacer algunas pruebas con un globo cautivo, se elevó en una montgolfiera hasta un kilómetro de altura (fig. 247), y los dos viajeros descendieron sanos y salvos á dos leguas de su punto de partida, despues de haber cruzado todo Paris. El 1.° de diciembre de 1783 efectuóse otra memorable ascension, remontándose desde el Jardin de las Tullerías un globo lleno de hidrógeno, de 26 piés de diámetro, provisto de lastre y de una válvula en su parte superior: al principio subió hasta unas 300 toesas: Charles y Robert iban en su barquilla, y habiendo bajado el segundo, el primero volvió á partir solo elevándose á más de 1,500 toesas (el barómetro marcaba entónces 18 pulgadas y 10 líneas). Despues de estos primeros y victoriosos ensayos de la conquista de las regiones aéreas, multiplicáronse las ascensiones y los viajes, no sin que ocurrieran algunas catástrofes terribles, entre las cuales debemos citar la de que fué víctima el desgraciado y atrevido Pilâtre de Rozier, el cual pereció desastrosamente por haber caido de su globo al querer pasar de Francia á Inglaterra, imitando la travesía aerostática del Canal de la Mancha que Blanchard y Jeffrius efectuaron en enero de 1785, desde la costa de Dover á la de Calais.

En breve nos ocuparemos sucesivamente de las ascensiones que han tenido por objeto la exploracion científica del aire; pero ántes daremos algunos detalles acerca de la construccion y henchimiento de los globos, así como de las varias maniobras practicadas en sus excursiones por los aeronautas.

II

LAS MONTGOLFIERAS Y LOS GLOBOS.— CONSTRUCCION Y HENCHIMIENTO

Las montgolfieras y los aerostatos tienen por lo regular la forma de un globo casi esférico, terminado por su parte inferior en un apéndice cilíndrico ó cónico. Entre unas y otros media sin embargo la diferencia de que en la montgolfiera dicho apéndice tiene una ancha abertura que sirve para introducir en ella el aire calentado por el brasero, al paso que en el globo lleno de gas hidrógeno, el apéndice remata en punta, dejando tan sólo un estrecho orificio, lo suficientemente abierto para que en caso de dilatacion el gas pueda escaparse por él. Por lo demás, esta forma es la que tomaria naturalmente la envolvente de tela por efecto de la presion



Fig. 247.—Primera ascension aerostática de Pilatre de Roziers y de Arlandes el 21 de noviembre de 1783

del gas elástico en ella contenido, si dicha envolvente fuera extensible por igual en todas sus partes.

La envolvente en cuestion se compone de segmentos de tela cosidos unos con otros, y reunidos así como los meridianos de una esfera; importa sobremanera que no tenga ninguna grieta, que ni siquiera queden abiertos los agujerillos que hacen las agujas, y que la tela sea de un tejido muy tupido, lo más impermeable que sea posible, para impedir las fugas de gas, que en breve disminuirian la fuerza ascensional. Montgolfier empleó en su primer experimento tela forrada de papel, cosida sobre una red de bramante; en su segunda prueba, la tela era de jerga, forrada interior y exteriormente de papel muy doble. Ya hemos dicho que el globo de Charles era de seda con un baño de cautchuc. Los señores Barral y Bixio hicieron impermeable el globo que les sirvió para sus dos exploraciones de 1850, dán-

dole un baño de aceite de linaza espesado con litargirio. Por último, hay otro medio excelente que consiste en interponer una capa de cautchuc entre dos tiras de tafetan.

El globo está cubierto en todo su hemisferio superior de una red que se separa de él un poco más abajo de su ecuador; todas las cuerdas de esta red se reunen debajo del globo en un aro ó círculo de madera muy dura que á su vez sirve para suspender de él la barquilla (figs. 249 y 253). Gracias á esta disposicion, la carga resulta repartida con uniformidad en toda la superficie del globo envuelta por la red, dando la indispensable estabilidad á la barquilla y á los aeronautas.

Para henchir una montgolfiera, basta poner un braserillo debajo de la abertura de la cubierta y quemar en él algunas materias combustibles;

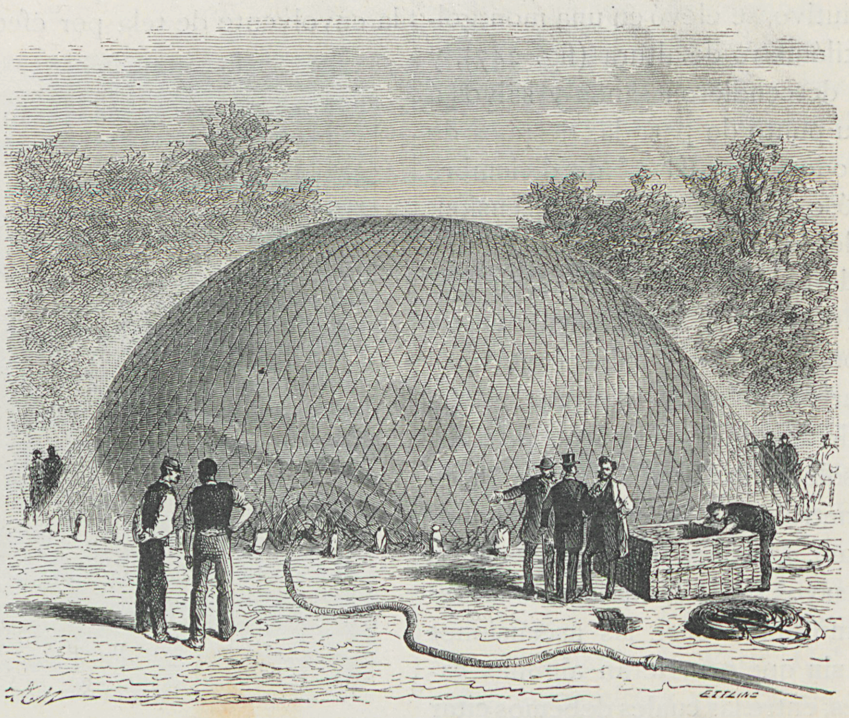


Fig. 248. — Henchimiento de un globo con hidrógeno

el aire calentado se reconcentra en la envoltura, y poco á poco su fuerza elástica distiende las paredes de aquella, haciéndola adquirir la forma esferoidal.

Cuando Montgolfier hizo sus primeros experimentos, creyó que la electricidad entraba por algo en el fenómeno de la ascension, miéntras que la verdadera causa de ésta era la ligereza específica del aire caliente, segun el principio de Arquímides. Así es que se creia favorecer la produccion del flúido empleando por combustible paja desmenuzada y lana humedecida. De Saussure demostró fácilmente que el gas producido no tenia más virtud sino la del aire caliente, y que la electricidad no tenia nada que ver con él.

Los aerostatos, ó globos henchidos con hidrógeno son por lo comun preferidos á las montgolfieras, aunque cuestan mucho más. La necesidad de llevar materias combustibles, el peligro de un incendio, y sobre todo, la inferioridad de la fuerza de ascension, mucho menor á igualdad de volúmen, son los motivos de esta preferencia (1).

Sin embargo, se ha perfeccionado ya la construccion de las montgolfieras, sustituyendo el molesto y voluminoso combustible de la paja ó de la lana, con una esponja empapada de espíritu de vino. El aeronauta Godard ha adaptado al brasero una chimenea tapada con tela metálica que preserva al globo del riesgo de un incendio. El uso de las lámparas de petróleo

---

(1) El peso de un metro cúbico de aire á 760 milímetros de presion es

de	1,293 gramos	á	0	grados
de	1,247	— á	10	—
de	945	— á	100	—
de	278	— á	1,000	—

Por lo tanto, la fuerza ascensional del aire caliente, que es tan sólo de 46 gramos por metro cúbico á 10 grados, y de 348 á 100, llega á 1,015 gramos á 1,000 grados. A 0 grados el impulso del hidrógeno puro es de 1,203 gramos; á 10 grados es de 1,160. Como es muy difícil conservar la temperatura del aire de una montgolfiera á un grado tan alto, y como la del aire exterior suele ser ménos de 0°, resulta de aquí que la fuerza ascensional es tambien mucho menor que la de un globo lleno de hidrógeno puro.

permitiria quizás regular, activar ó rebajar la temperatura como se quisiera, y por consiguiente subir ó bajar á voluntad del aeronauta.

El henchimiento de los globos con gas hidrógeno puro se hace del modo siguiente: El

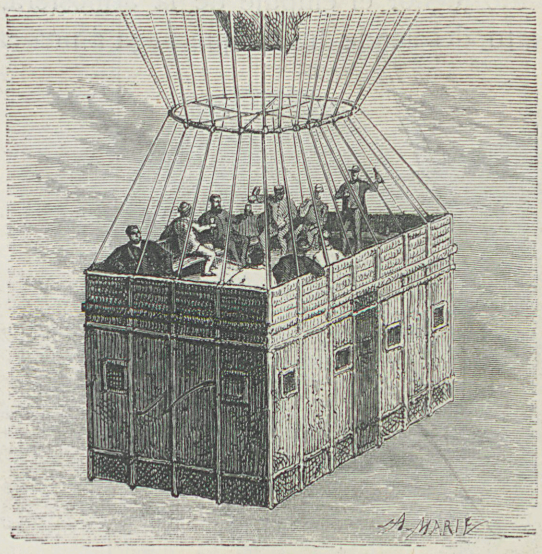


Fig. 249.—Barquilla del *Gigante*

gas se produce mediante la reaccion del ácido sulfúrico en el agua, el hierro ó el zinc (1). Estas sustancias están contenidas en una serie de toneles colocados de modo que el gas se recoge conforme se va formando, debajo de una campana invertida en una cuba de agua, análoga á los gasómetros. Desde allí, y despues de purificarse al pasar al través del agua, penetra el gas por un tubo en el apéndice inferior de la envoltura, y el globo se hincha poco á poco por efecto de la fuerza elástica del gas.

En lugar de hidrógeno puro, se hace uso con más frecuencia del gas del alumbrado, que es un carburo de hidrógeno. Verdad es que la densidad de este gas es mucho mayor, puesto que llega á 0,63 de la del aire (2); y que por lo tanto la fuerza ascensional es bastante menor; pero la ventaja de obtener fácilmente en las ciudades una cantidad de gas á menudo muy considerable lo recomienda por muchos conceptos. El aeronauta inglés Green decarburaba por un método especial el gas del alumbrado, con objeto de conseguir otro más ligero. M. Glaisher recomienda con el mismo objeto el gas que resulta al terminar las operaciones de destilacion. En su ascension del 30 de junio de 1862 obtuvo así un gas cuya densidad habia bajado á 0,36 próximamente, y que le proporcionaba una fuerza ascensional de 830 gramos por metro cúbico, ó sean los dos tercios de la del hidrógeno puro.

Digamos ahora sucintamente cómo y en virtud de qué maniobras el aeronauta sube ó baja á su albedrío: no hablaremos en este momento de la direccion de los globos, porque todo movimiento en sentido horizontal depende tan sólo de la corriente aérea que arrastra al globo con una velocidad casi igual á la de la masa de aire misma; con los aparatos ordinarios, la direccion de los globos es enteramente ajena á la intervencion del aeronauta; intervencion que se limita á subir ó bajar verticalmente, hasta que encuentra una capa de aire animada de un movimiento que vaya en la misma direccion que él se propone seguir.

Si el aeronauta viaja en una montgolfiera, avivando el fuego y elevando así la temperatura del aire contenido en el interior, disminuye su densidad y por lo mismo aumenta en igual grado la fuerza ascensional del aparato. En cambio, amortiguando el fuego ó dejándole apagar, pro-

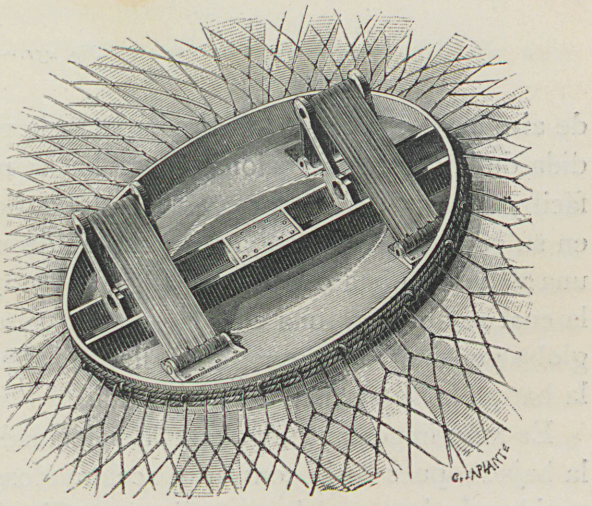


Fig. 250.—Válvula del *Emprendedor*

duce un efecto contrario, y el aparato tiende á bajar.

En los globos henchidos con hidrógeno no se emplean los mismos medios. Cuando el aeronauta quiere subir no puede aumentar la fuerza ascensional sino á expensas de la carga de la barquilla: le es preciso arrojar lastre, el cual

(1) El globo de que se sirvieron en 1850 los señores Barral y Bixio habia sido henchido con hidrógeno puro producido por la reaccion del ácido clorhídrico en agua y hierro. El lavado del gas es cosa importante, para que no conserve ningun ácido capaz de aminorar la solidez de la tela del globo.

(2) A 0 grados y 760 milímetros de presion, la fuerza ascensional del gas del alumbrado es de 693 gramos por metro cúbico, y á 10 grados no pasa de 670 gramos.

suele consistir en saquillos llenos de arena que va desparramando poco á poco, sin riesgo de las personas que pudieran hallarse debajo del globo. Pero el lastre es un recurso muy limitado que se agota pronto; y en muchas ascensiones, la necesidad de disminuir la rapidez de la caida ó del descenso ha obligado á lanzar fuera de la barquilla todos los objetos de peso, como víveres, ropas, instrumentos, etc.

Para bajar, se hace salir del globo cierta cantidad de gas. La envoltura se vacia en parte, el volúmen del globo disminuye, y siendo por lo tanto menor el empuje de la atmósfera, el aparato desciende hasta que llega á una capa

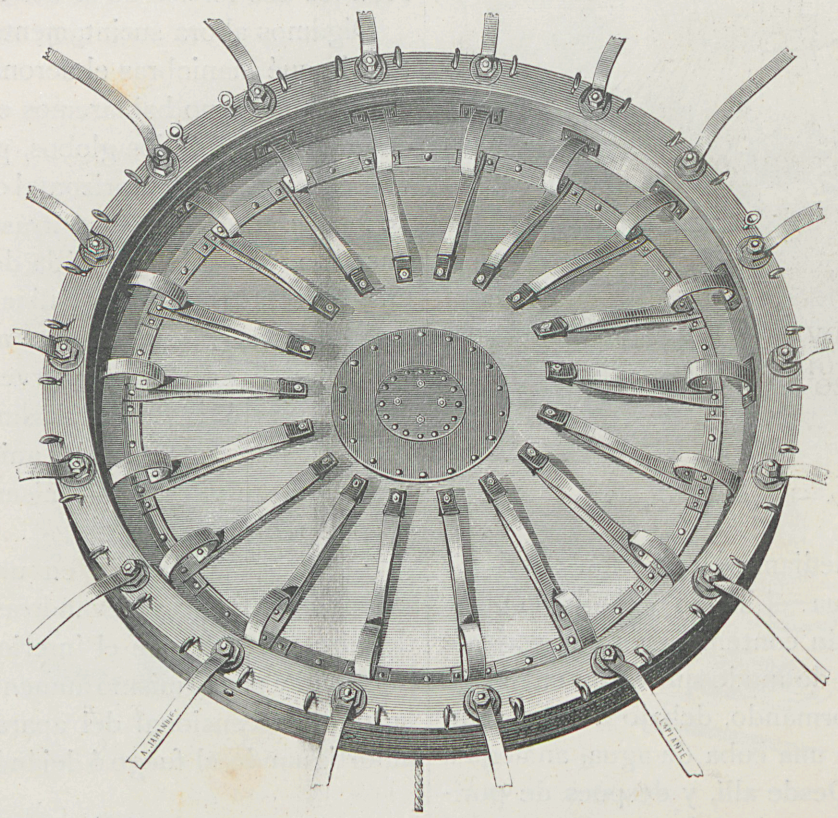


Fig. 251.—Válvula del *Polo norte*

de aire cuya mayor densidad compensa la pérdida de la fuerza ascensional. Para hacer más fácil y segura la salida del gas, el globo tiene en su parte superior una abertura cerrada con una válvula sujeta con muelles (figs. 250 y 251) la cual se abre con una cuerda que atraviesa el globo por dentro de arriba abajo llegando hasta la barquilla, al alcance del aeronauta.

Es muy importante moderar la velocidad de la bajada, pues de lo contrario, acelerándose la rapidez de ésta, podria ser peligrosa. «Si se bajase de golpe desde una altura considerable, dice Barral, la velocidad que se habria adquirido al llegar á tierra seria espantosa, y el areonauta podria muy bien estrellarse contra el suelo. Por esta razon se desciende por *cascadas*, es decir, primero 500 metros; luégo, tirando lastre, se suben otros 100, para bajar en seguida 500 más, subir de nuevo, y así sucesivamente hasta llegar á tierra, cosa que un hábil aeronauta puede hacer con suma precision y sin percance alguno.»

Cuando la bajada es definitiva, y por cualquier motivo el aeronauta quiere llegar á tierra una vez terminado su viaje, se vale de una cuerda (fig. 253) provista de nudos, que cuelga de la barquilla y que vendrá á tener unos cincuenta metros de largo. Conforme va tocando el suelo una cantidad mayor de este lastre de nuevo género, disminuye otro tanto el peso que sustenta la barquilla, lo cual comunica al globo cierta tendencia á remontarse, atenuándose al propio tiempo la rapidez de la caida. Finalmente, se llevan tambien una ó dos áncoras que agarrándose á las asperezas del terreno, á los árboles, matorrales, peñas, etc., detienen definitivamente al globo en su carrera. Como se comprenderá, la utilidad de todos es-

tos accesorios así como la eficacia de su manejo dependen sobre todo de la destreza y práctica del aeronauta.

Poco tiempo despues de la invencion de los globos, ocurrióse la idea de emplear en caso de accidente un aparato especial conocido con el nombre de *paracaidas*, cuya primera idea data

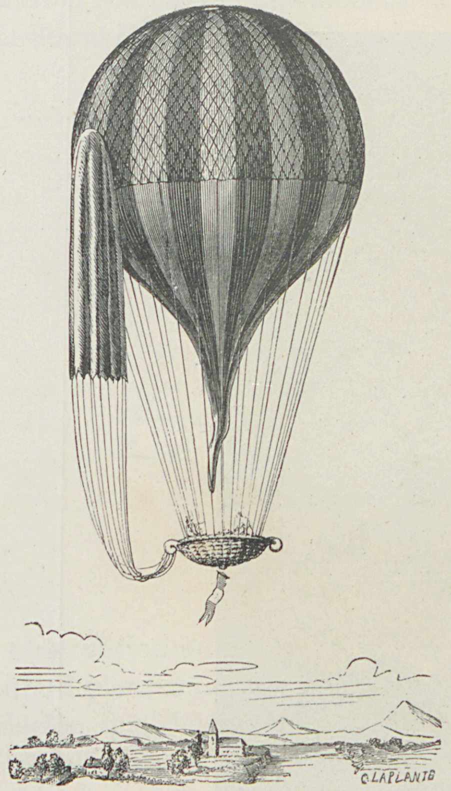


Fig. 252. — Globo provisto de su paracaidas

de más larga fecha. Es una especie de media naranja formada de segmentos de tela cosidos entre sí, que se abre y cierra á la manera de un paraguas. Colgado en la parte inferior ó en un punto cualquiera del ecuador del globo, va unido á la barquilla por medio de un sistema de cuerdas colocadas de modo que la sostienen juntamente con su carga tan luégo como se corta la cuerda de la cual está suspendido. El paracaidas, desprendido del globo, empieza por caer con rapidez creciente, pero la resistencia del aire hace desplegar cada vez más su superficie, hasta que queda del todo abierto, y el aparato entero puede bajar así poco [á poco hasta el suelo.

Se ha hecho muy poco uso del paracaidas; el aeronauta Garnerin (1802) fué el primero que se arriesgó á dejarse caer con un aparato de esta clase desde 1,000 metros de altura; pero como no tuvo la precaucion de practicar préviamente en la cúspide del paracaidas una abertura por la cual pudiera salir el aire, sufrió sacudidas bastante bruscas ocasionadas por las masas de aire que se escapaban lateralmente, tan pronto á un lado como á otro. A ménos de sobrevenir percances muy serios, como el de desgarrarse la tela del globo, los aeronautas consideran las maniobras del descenso del aerostato tan seguras como las del paracaidas, que en la mayoría de las ascensiones sólo serviria de estorbo y seria un peso inútil.

III

DE LA NAVEGACION AÉREA Ó DE LA DIRECCION DE LOS GLOBOS

Hasta ahora ha sido posible remontarse á los aires con auxilio de los globos y áun llegar á regiones de altitud considerable, y muchos aeronautas han recorrido en un solo viaje distancias bastante grandes. Pero todos estos viajes aéreos se han efectuado en una direccion que dependia de la de las corrientes atmosféricas á varias alturas, y no de la voluntad del que iba en el globo. El problema de la navegacion aérea, de la direccion de los globos, no está aún resuelto como lo está hace ya mucho tiempo el de la direccion de los buques y de la navegacion marítima.

Pero este problema ¿es susceptible de solucion?

No tenemos la pretension de responder terminantemente á una pregunta tan controvertida y con tanta frecuencia, ni mucho ménos de enumerar las mil y mil tentativas de soluciones, teóricas ó prácticas, que se han propuesto de un siglo casi á esta parte. Tan sólo diremos que entre los que se han propuesto resolverlo, ha habido muchos que han abandonado, por razones plausibles al parecer, la idea de dirigir á su albedrío esos aparatos, en los cuales tienen tanto predominio las corrientes aéreas. Aparte de la dificultad de cargar la barquilla de un globo con el peso de un motor bastante poderoso para mover un mecanismo cualquiera, ya sea de paletas ó de hélice, se ha tenido muy en cuenta el peligro de una explosion en el caso de que este motor tuviese un generador de vapor y por consiguiente un hornillo; y bajo este punto de vista el hidrógeno ha parecido un gas

sobrado peligroso. Tomando entónces por modelo el aparato ascenso-motor de las aves, han dirigido sus esfuerzos á descubrir medios adecuados á elevar y mover aparatos *más pesados que el aire*, con objeto de reducir así la resistencia que oponen las corrientes aéreas á una gran superficie, á la vez que con el de evitar cualquier riesgo de explosion ó de incendio. Teóricamente hablando, el problema es posible; la dificultad consiste en su realizacion práctica. Pero de todos modos, es extraño al asunto que nos ocupa en este momento.

Dejando pues á un lado la *aviacion*, volvamos á la navegacion aérea en globo. Por poco

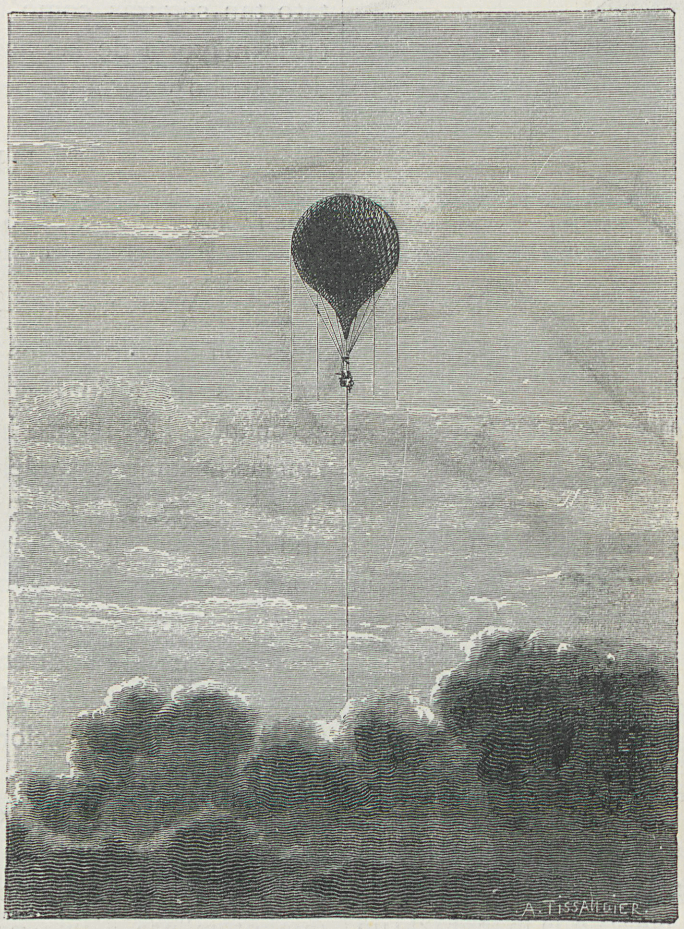


Fig. 253.—Globo con su cuerda-guía

que se reflexione en la cuestion, reconócese desde luégo que no hay lugar á pensar en la direccion absoluta de los globos, del propio modo que los marinos no pueden pensar en la direccion absoluta de los barcos; para que esto fuese posible, seria menester que la atmósfera, como el mar, estuviese completamente tranquila y que no hubiese ni la más leve corriente de aire. Pero en ninguna parte se encuentra esta calma, esta carencia de movimiento de la masa del aire, y por lo tanto, desde el momento en que la direccion del viento no es rigurosamente la de la marcha que se propone seguir el aeronauta (1), todo cuanto se puede y se debe procurar es conseguir por medios apropiados que el globo se desvie un tanto de la direccion del viento. Por este concepto se han hecho no há mucho investigaciones y pruebas más ó ménos afortunadas, de las que diremos algunas palabras.

A M. Giffard, el célebre ingeniero francés inventor del inyector automático de las locomotoras, se deben los primeros experimentos

(1) Un globo, impelido por una corriente aérea, marcha con la misma velocidad de las masas de aire en las que está sumergido, sin sacudida, sin ninguna oscilacion que dé á conocer este movimiento. El problema de la direccion quedaria pues resuelto, y del modo más seguro, natural y económico, si se pudiera encontrar siempre á una altura accesible un viento cuya direccion fuese la del viaje proyectado. En este caso, bastaria subir ó bajar, es decir, arrojar lastre ó dar salida al gas. Pero ¿se tiene la seguridad de que existan semejantes corrientes en cualquier época? Es probable que no, y que este sencillísimo sistema de navegacion aérea sea tan problemático como todos los demás. Por excepcion puede ser el mejor de todos.

hechos en tal sentido, los cuales datan de 1852. Es indudable que la fuerza ascensional de un globo esférico lleno de hidrógeno ó de cualquier otro gas más ligero que el aire depende del volúmen que desaloja, de su capacidad, y por lo tanto es proporcional al cubo de su diámetro. La resistencia vertical que su envolvente experimenta en el sentido del movimiento, la fuerza que necesitaria oponer en sentido opuesto al de la corriente que la arrastra varían únicamente, en igualdad de circunstancias exteriores, como el cuadrado de este mismo diámetro. Vése pues que es ventajoso dar al globo las mayores dimensiones posibles, por cuanto el peso y por consiguiente la potencia del motor que pueda embarcar y que ha de servir para lograr la desviacion apetecida, han de ser tambien los mayores posibles.

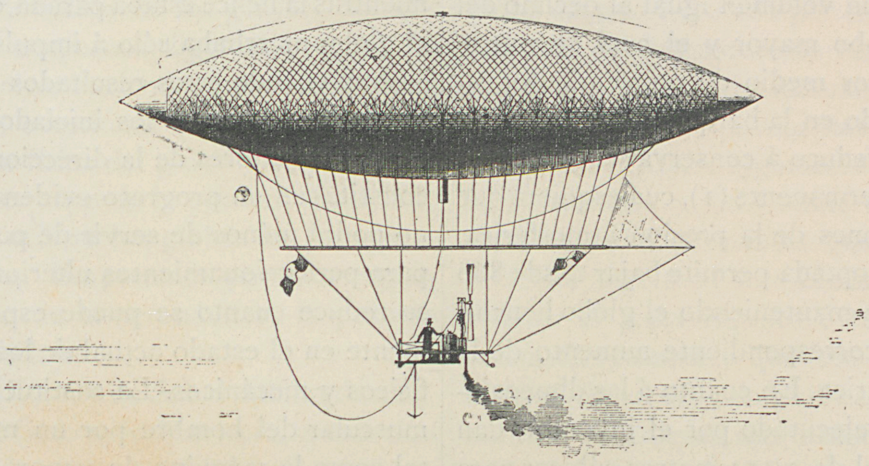


Fig. 254.—Globo dirigible de M. Giffard

Esta observacion no era nueva, cuando monsieur Giffard planteó de otro modo la cuestion de la relacion que debia establecerse entre la capacidad del globo y la resistencia del aire. Vió que la forma esférica distaba mucho de ser la más ventajosa, y adoptó la de un globo alongado en el sentido del movimiento, especie de elipsoide terminado en punta en los extremos de su eje mayor; forma representada en la figura 254. El globo que hizo construir con arreglo á este modelo tenia 49 metros de longitud, 12 de diámetro trasversal y cubicaba 2,400 metros. Un globo esférico de 12 metros de diámetro, es decir, un globo que hubiera de vencer la misma resistencia, no habria cubicado más que 300 metros; por consiguiente, la fuerza de ascension resultaba triplicada.

La red que lo rodeaba servia de sosten á un travesaño de madera que en su extremo posterior llevaba una vela triangular, la cual hacia las veces de timon. Una máquina de vapor de la fuerza de tres caballos colocada en la barquilla ponia en movimiento una hélice cuyos brazos podian efectuar ciento diez revoluciones por minuto. El peligro que pudiera ofrecer la presencia del fuego y del hidrógeno, de ese gas tan inflamable, se evitaba gracias á la disposicion de la caldera de la máquina, la cual tenia un hornillo de llama invertida.

Dos pruebas hechas, la primera en 1852 con un globo de forma elipsoidal, y la segunda en 1855 con otro semejante, pero mayor y más largo, no dieron resultados muy satisfactorios, áun cuando en la primera se consiguió una marcada desviacion de la línea del viento.

M. Dupuy de Lôme estudió á su vez el problema veinte años despues, en 1870, y por decirlo así en los mismos términos, lo que prueba que la solucion de Giffard no carecia de fundamento razonable. El gobierno de la Defensa nacional habia encargado durante el sitio de Paris al sabio constructor de los buques acorazados franceses, que construyera un globo dirigible. No fué posible terminar los ensayos en tiempo hábil, mas se prosiguieron despues de concluida la guerra, y en enero de 1872, monsieur Dupuy de Lôme pudo dar remate á la construccion de un globo cuya forma, disposiciones y mecanismo habian sido calculados con el preciso objeto que acabamos de indicar. Describámosle sucintamente.

Así como el globo dirigible de M. Giffard,

el de M. Dupuy de Lôme es de forma oval ú oblonga, con un eje de menor resistencia en el sentido del movimiento. La fuerza de propulsion se obtiene mediante el movimiento de una hélice de dos ó cuatro brazos, con alas cubiertas de tafetan, á la cual hacen dar vueltas por medio de una cábria varios hombres que se relevan alternativamente. El globo va lleno de gas del alumbrado, y lleva interiormente otro pequeño globo de volúmen igual al décimo del volúmen del globo mayor y el cual se puede llenar de aire por medio de un ventilador situado y manejado en la barquilla. La mision de este globito se reduce á conservar al globo mayor una forma permanente (1), cualesquiera que sean las variaciones de la presion atmosférica; la proporcion adoptada permite bajar desde 866 metros de altura manteniendo el globo henchido á pesar del correspondiente aumento de la presion barométrica. En cuanto á las dimensiones del aparato ejecutado por el inventor, dan un volúmen total de 3,454 metros cúbicos para el globo mayor, y de 345^{m},4 por consiguiente para el globito interior. Un timon, formado por una vela triangular puesta bajo el globo, á la parte posterior, sirve para dar al aparato la direccion apetecida y cambiarla como se quiera. El 2 de febrero de 1872 se hizo una prueba con este globo, y dió resultados que parecieron satisfactorios, por cuanto á pesar de reinar un viento bastante fuerte, la hélice le imprimió una velocidad propia de unos 10 kilómetros y cuarto por hora. Merced á ella, el globo podia desviarse, cuando la hélice se ponia en movimiento, de 10 á 12 grados de la marcha seguida miéntras la hélice estaba parada, es decir, cuando el globo marchaba sólo á impulso del viento.

Aun cuando estos resultados no hayan sido tan brillantes como los iniciados por tantos y tantos inventores de la direccion de los globos, constituyen un progreso evidente, formal, que no podrá ménos de servir de punto de partida para perfeccionamientos ulteriores. Pero á esto se reduce cuanto se puede esperar razonablemente en el estado actual de los conocimientos físicos y mecánicos. La sustitucion de la fuerza muscular del hombre por un motor poderoso, tal como la máquina de vapor, es el *desideratum* principal del problema de la navegacion aérea con globos llenos de gas hidrógeno. Toda la cuestion estribaria en ponerse completamente á cubierto del peligro de la inflamacion del gas.

CAPÍTULO VIII

LA NAVEGACION AÉREA APLICADA AL ARTE MILITAR Y Á LOS ESTUDIOS METEOROLÓGICOS

I

AEROSTACION MILITAR

Hemos hablado ya del entusiasmo que produjeron las primeras ascensiones aerostáticas. Ha trascurrido un siglo desde la invencion de Montgolfier y de Charles, y no cesa la admiracion causada por esa conquista del hombre sobre los dominios del aire, dominios que parecian por siempre inaccesibles á una exploracion directa. Remontarse á los aires hasta una altura que á menudo traspasa la region de las nubes, cruzar grandes distancias á impulso de las cor-

(1) M. Dupuy de Lôme considera esta condicion como absolutamente necesaria para conseguir un globo dirigible. Véase cómo la formula y justifica:

«Empiezo por consignar en principio que para tener un globo dirigible, en su movimiento horizontal á través del aire ambiente, cualquiera que sea la forma del globo-portador, así como la clase del motor y del propulsor, se necesita ante todo poder reunir las dos condiciones siguientes: 1.ª conseguir la permanencia de la forma del globo sin ondulaciones marcadas de la superficie de su tela, ni por efecto de la accion de la corriente de aire producida por la velocidad de traslacion, ni por la influencia de los descensos de temperatura, ni por la de los aumentos de presion atmosférica, cuando se desciende total ó parcialmente; 2.ª dar al globo mayor, así como al conjunto del aparato, un eje bien marcado, de menor resistencia en su sentido horizontal, y en una direccion ostensiblemente paralela á la de la fuerza impelente.

»Si no se llena la primera condicion, la *permanencia de la forma*, y se deja que el globo mayor se deshinche en ciertos momentos, no tan sólo resultarian en la superficie de la tela concavidades contrarias á la direccion de la marcha, las cuales aumentarian la resistencia de la corriente de aire en considerable proporcion, sino que, cambiando á cada instante la direccion de esta resistencia en una superficie ondulada, con relacion á la direccion de la fuerza motriz, no habria timon capaz de corregir esas variaciones incesantes en la direccion de la resistencia.»

(Nota acerca del globo de hélice construido por cuenta del Estado segun los planos y bajo la direccion de M. Dupuy de Lome.)

rientes aéreas, en medio de una calma y de un silencio absolutos, contemplar los aspectos nuevos, tan variados como deslumbradores, de los paisajes celestes, todo esto es en efecto más que suficiente para excitar la curiosidad é inflamar la imaginacion. Pero la invencion de los globos ha hecho además concebir la idea de aplicarlos á descubrimientos más útiles. Aparte del gran problema, no resuelto todavía, de la navegacion aérea y de la direccion de los globos, del que acabamos de ocuparnos ligeramente, se ha tratado de resolver haciendo ascensiones aerostáticas muchas cuestiones que interesan particularmente á la física del globo y á la meteorología. A los diez años de la primera invencion, pensóse ya en utilizar los globos en las operaciones militares. Empecemos por esta importante aplicacion de la aeronáutica, la primera por órden de fechas.

En 1793, el Comité de Salud pública decidió, á propuesta de Guiton de Morveau, la creacion de compañías de aeronautas ó *aerosteros*, cuyo cometido consistia en observar desde globos cautivos los movimientos y posiciones de los ejércitos enemigos.

El físico francés Coutelle recibió el encargo de ir á Maubege á proponer al general Jourdan que su ejército hiciese uso de un globo. Despues de efectuarse en Paris algunas pruebas relativas á la preparacion del gas necesario para henchir el globo y al manejo del aparato, Coutelle se encaminó á Maubege, donde en compañía de un oficial de Estado mayor pudo examinar en detalle, los trabajos, posiciones y fuerzas del enemigo. Al poco tiempo prestó en Charleroi los mismos servicios al ejército francés, y contribuia en parte á la victoria de Fleurus; en Maguncia, en Manheim y en Francfort se utilizaron compañías de aeronautas organizadas del mismo modo que la que estaba á las órdenes de Coutelle, y desde el ejército del Rhin fueron enviadas á Egipto. Al conocer la Convencion los primeros resultados obtenidos por Coutelle en el ejército del Sambre y Mosa, dispuso que se organizara en Meudon una escuela aerostática, pero Bonaparte, al regresar de su expedicion á Egipto, la mandó cerrar definitivamente (1). A pesar de esto, Carnot se valió de esta nueva clase de exploradores en el sitio de Amberes, en 1815.

Finalmente, durante la gran guerra de secesion, el gobierno de los Estados Unidos ocupóse de la aerostacion militar. Mediante un sistema de telegrafía eléctrica, el aeronauta se ponia en comunicacion con el ejército federal. El profesor Lowe practicó especialmente cerca de Fairfax (Virginia) un reconocimiento en un globo cautivo tripulado por tres personas, que miéntras duró la ascension estuvieron comunicando con el ejército federal por un hilo telegráfico. Otros dos aeronautas americanos, La Mountain y Allan, organizaron á imitacion de la Convencion y del Comité de Salud pública un cuerpo de aeronautas que prestó grandes servicios al general Mac-Clellan. Acerca de este asunto, hé aquí algunos detalles que nos parecen interesantes y que tomamos de la traduccion de un artículo publicado en el *Diario militar de Darmstadt*, hecha por el coronel d'Herbelot:

«A últimos de mayo de 1862, el ejército unionista, acampado delante de Richmond, remontó sobre la plaza un globo cautivo. Merced á un aparato fotográfico se pudo reducir en perspectiva, en un mapa, todos los terrenos desde Richmond hasta Manchester al oeste, y hasta Chikahoming al este. El rio que baña la capital, las corrientes, los ferro-carriles, los caminos de travesía, los pantanos, los pinares, etc., todo quedó trazado en dicho mapa, así como la colocacion de las tropas, baterías de artillería, infantería y caballería. Sacáronse dos ejemplares, y se los dividió en 64 partes con los signos convencionales A, A[1], etc.; el general Mac-Clellan se quedó con uno y el conductor del globo con el otro.

»Acabamos de ver á la fotografía como auxiliar de la aerostacion; veamos ahora á la telegrafía. Los resultados fueron bastante ventajosos, como se comprenderá por lo siguiente:

»El mal tiempo retuvo al ejército todo un dia en el campamento; pero el 1.° de junio á eso del medio dia el globo se remontó á más de mil piés de altura sobre el campo de batalla, y se

(1) «El futuro emperador, dice Gaston Tissandier, en su interesante obra titulada *Historia de mis ascensiones*, conocia á los fundadores de esta escuela, Coutelle y Conté, y sabia cuán grande era su celo por la libertad y su lealtad á la República.» En 1821 se presentó a gobierno de la Restauracion un proyecto de reorganizacion de los aeronautas militares. Nombróse una comision que emitió su dictámen favorable, pero el proyecto quedó archivado en el ministerio.

puso en relacion con el cuartel general por medio de un hilo telegráfico. Por espacio de una hora se anunciaron desde el globo con toda exactitud los movimientos del enemigo. Media hora despues recibióse un despacho que decia: *Salida de la division Cadeys.* En un momento pudo el general Mac-Clellan dar órden de avanzar al general Heinsselmann y prescribir al general Summer, que estaba ya más allá de Chikahoming, que marchara en derechura hácia el riachuelo. Reunidas ambas divisiones á las dos horas, hacian frente al enemigo y defendian el campo de batalla. Donde quiera que los sitiados trabaron combates, fueron rechazados con pérdidas considerables y atacados en los puntos más débiles por fuerzas superiores. Los separatistas asestaron contra el globo un cañon rayado de mucho alcance, cuyos proyectiles estallaron tan cerca de él que los aeronautas juzgaron prudente retirarse. Bajóse el globo á tierra, pero elevado de nuevo en otra direccion y bastante alto para ponerse fuera del alcance de las piezas enemigas, se puso otra vez en comunicacion con el cuartel general, dándole aviso de que acudian fuertes masas de tropas al campo de batalla en otra direccion. Tan luégo como estas tropas llegaron á tiro de cañon de los federales, vieron prevenida su presencia con una rapidez que debió parecerles incomprensible. No parecia sino que el Dios de las batallas les hubiera abandonado completamente en aquel dia. Avanzaban, pero sólo para servir de blanco á los cañones de los yankees; no podian encaminarse á ninguna parte sin tropezar con una impenetrable muralla de bayonetas. Habiéndose frustrado cuantas tentativas hizo el ejército del Sur para romper las líneas enemigas, Mac-Clellan mandó un ataque general á la bayoneta, y rechazó á sus adversarios con enormes pérdidas. Aquel general no hubiera podido alcanzar un éxito tan completo sin el auxilio del globo, y sin el aparato telegráfico de que éste iba provisto.»

Durante la guerra franco-prusiana, á la que tan desdichadamente precipitó el segundo imperio á la Francia, los globos han desempeñado cierto papel, pero hablando propiamente, no se les ha utilizado en las operaciones militares. Paris, asediado y privado de toda comunicacion con el resto de Francia, pudo enviar sus despachos, sus correspondencias y algunas personas encargadas de misiones militares ó políticas, en globos que se remontaban cuando soplaba un viento favorable hácia los puntos no ocupados por los ejércitos enemigos.

El gobierno de la Defensa nacional despachó así sesenta y cuatro globos, con 2.500,000 cartas, los cuales fueron á llevar á los departamentos noticias de la gran ciudad sitiada y la seguridad de la heróica resolucion que habia formado de resistir hasta el último trance. Por desgracia, estos mensajeros aéreos no podian regresar, porque la ruta seguida por ellos estaba á merced del viento. Al marchar, las direcciones divergentes de los globos tenian tres probabilidades contra una de ir á parar á un país amigo; y lo cierto fué que así sucedió con la mayor parte de ellos; pocos fueron los que cayeron en las líneas prusianas. Uno de ellos, *la Ciudad de Orleans*, no paró hasta Noruega; otros dos ó tres se perdieron, probablemente en el mar. Verdad es que en las provincias se hicieron varias tentativas para dirigir algunos globos hácia Paris, pero no tuvieron éxito, pues ésto sólo podia esperarse de una casualidad afortunada. El único medio eficaz de recibir correspondencias de vuelta fué la organizacion del *correo por medio de palomas viajeras:* más adelante tendremos ocasion de decir algo acerca de este medio, cuando tratemos de la fotografía microscópica.

II

LAS ASCENSIONES AERONÁUTICAS Y LOS ESTUDIOS DE METEOROLOGÍA Y DE FÍSICA DEL GLOBO

Al terminar Lavoisier el dictámen que presentó en 1783 á la Academia de ciencias *sobre la máquina aerostática* de Montgolfier, y en el cual hizo el relato de las primeras ascensiones, se expresó del modo siguiente acerca de la utilidad del reciente descubrimiento:

«Pasemos ahora á ocuparnos de las aplicaciones y usos de la máquina aerostática; mas al llegar á este punto nos detiene la multiplicidad misma de los que se presentan, pues se necesitaria un volúmen entero para exponer detalladamente todos aquellos en que se la puede emplear. Nos limitaremos pues á decir que podrá servir dicha máquina para levantar

pesos á cierta altura, para cruzar montañas, llegar á la cima de aquellas á las que nadie ha logrado subir, bajar á valles ó sitios inaccesibles, elevar fanales de noche á grandísima altura para hacer toda clase de señales, ya en tierra, ya en mar. Todos estos usos, ó por lo ménos gran parte de ellos, se les habian ocurrido ya á los hermanos Montgolfier. Pero el globo tendrá además muchas aplicaciones en física, y podrá servir tambien para conocer la velocidad y direccion de los diferentes vientos que soplan en la atmósfera, para tener electróscopos á mucha mayor altura que la que se alcanza con cometas, y finalmente para remontarse á la region de las nubes é ir á observar desde ella los meteoros.

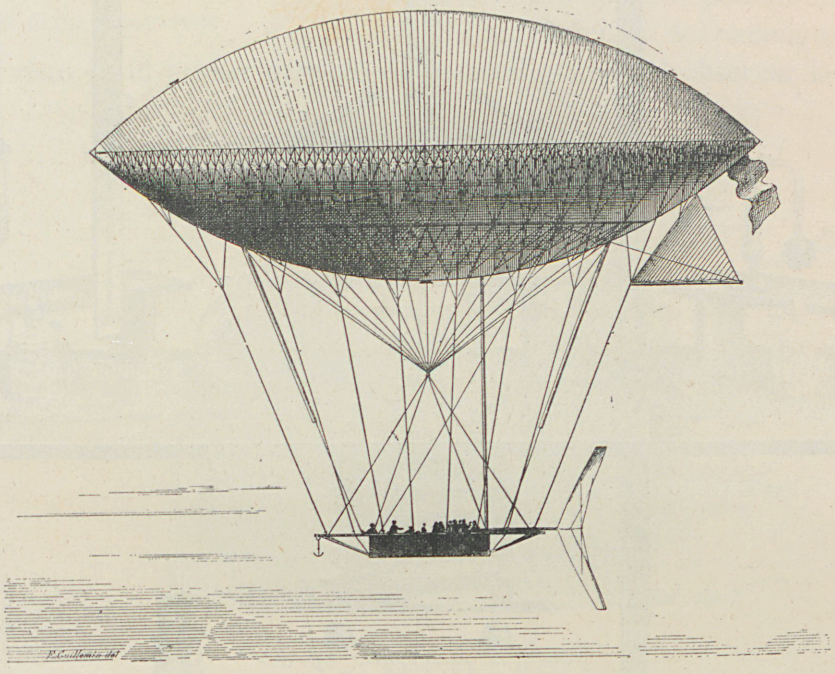


Fig. 255.—Globo dirigible de M. Dupuy de Lome

»Es de presumir además que todos estos usos se multiplicarán cuando se haya perfeccionado esta máquina, y que sus consecuencias serán muy distintas y trascendentales si algun dia se consigue dirigirla.»

Todavía no se ha realizado esta última esperanza, y si bien el arte de la aeronáutica ha hecho grandes progresos de un siglo á esta parte, debemos convenir en que las aplicaciones útiles que predecia Lavoisier continúan casi todas en estado de *desiderata*. Se han efectuado ya miles de ascensiones, algunas de las cuales han servido, segun hemos visto, para las operaciones militares; un corto número de aeronautas se ha dedicado exclusivamente á hacer investigaciones de física ó de meteorología, y los resultados obtenidos son hasta el presente harto menguados si se tiene en cuenta el celo y la abnegacion de aquellos á quienes se deben.

La primera ascension científica fué la de Robertson en 1803. Este *físico-aeronauta*, como se titula á sí mismo, subió á grandes alturas (hasta 3,679 toesas, 7,170 metros) y desde ellas hizo observaciones termométricas, barométricas y magnéticas.

Siguen á continuacion las célebres ascensiones de Biot y Gay-Lussac en 1804. Estos dos sabios se elevaron el 24 de agosto de dicho año hasta 4,000 metros de altura, é hicieron una serie de experimentos sobre las oscilaciones de la aguja imantada con objeto de averiguar las variaciones de la intensidad magnética con la altura. Tres semanas despues, Gay-Lussac efectuó solo una ascension, en la que llegó á 7,000 metros de altura vertical, pudiendo reconocer que la composicion del aire atmosférico á esta altura es químicamente la misma que en la superficie de la tierra. En el momento de su partida vió que en tierra habia una temperatura de +27°,75 centígrados, miéntras que á la mayor elevacion era de —9°,5, ó sea una diferencia de más de 37 grados.

Entre las ascensiones científicas contemporáneas debemos citar ante todo las de Barral y

Bixio en 1850, y luégo las treinta ascensiones que el aeronauta inglés Glaisher efectuó de 1860 á 1865. Uno de los resultados más curiosos de la segunda ascension de los dos primeros personajes, fué el averiguar que en pleno verano habia nubes formadas enteramente de agujas de hielo, cuyas nubes tenian lo ménos 4 kilómetros de espesor. Los señores Barral y Bixio observaron además que la temperatura en tan altas regiones era de 39 grados bajo cero, casi la de la congelacion del mercurio.

Los viajes de Glaisher y los que los jóvenes y animosos aeronautas franceses Fonvielle, Flammarion y Tissandier hicieron algunos años

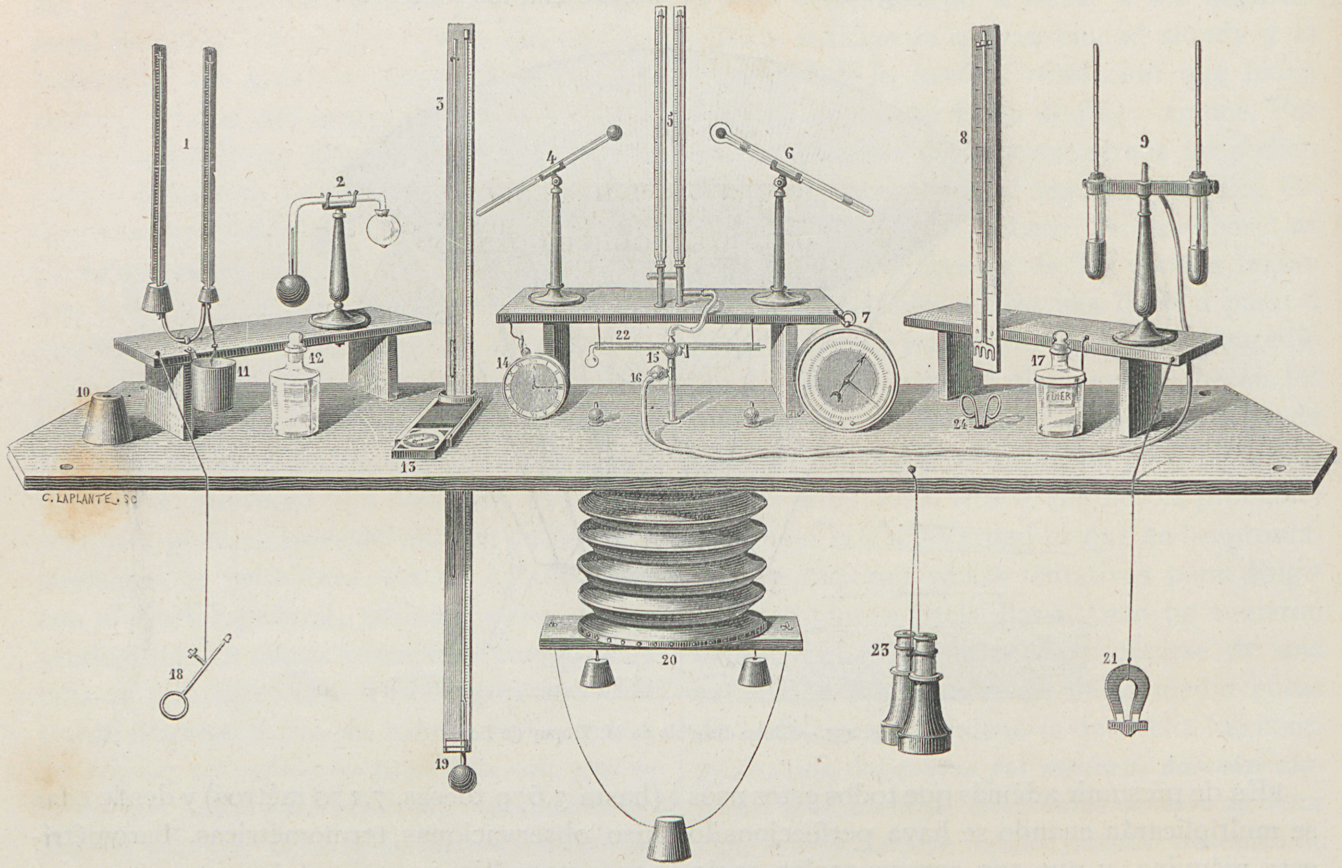


Fig. 256.—Instalacion de los instrumentos de M. Glaisher para una ascension científica

1. Termómetros de bola seca y de bola húmeda.—2. Higrómetro de Daniel.—3. Barómetro de mercurio.—4. Termómetro de bola ennegrecida.—5. Termómetros seco y húmedo.—6. Otro termómetro de bola ennegrecida.—7. Barómetro metálico.—8. Termómetro sumamente sensible con la bola en forma de parrilla.—9. Higrómetro de Regnault.—10. Tapa cónica del termómetro seco.—11. Vasija con agua para el termómetro húmedo.—12. Frasco de agua de reserva.—13. Brújula.—14. Cronómetro.—15. Llave correspondiente al número 5.—16. Llave correspondiente al número 9.—17. Frasco de éter para el higrómetro de Regnault.—18. Lente para observar los instrumentos.—19. Parte inferior del barómetro de mercurio provista de un contrapeso para que no se separe de la vertical.—20. Fuelle aspirador para los termómetros seco y húmedo.—21. Iman.—22. Índice termométrico.—23. Gemelos.—24. Tijeras.

atrás están descritos detalladamente en una obra interesante titulada *Los viajes científicos aéreos*, á la cual remitimos al lector deseoso de conocer las peripecias de esta clase de expediciones.

Pero debemos hacer especial mencion de dos ascensiones verificadas durante el año 1875, la segunda de las cuales será siempre tristemente célebre en los anales de la aerostacion y de la ciencia. La primera fué notable por su larga duracion. El globo el *Zenit*, salido el 23 de marzo de la fábrica de gas de la Villette en París á las 6 h. 20' de la tarde, yendo en él los aeronautas Crocé Spinelli, Sivel, G. y A. Tissandier y Robert, descendió á las 5 de la tarde del dia siguiente en el Gironda, cerca de la playa de Arcachon. Durante este largo trayecto se hicieron muchas observaciones científicas. A las tres semanas verificóse otra ascension en el mismo globo, tripulado por los tres primeros aeronautas ántes citados. El *Zenit* llegó dos veces á extraordinaria altura, que, segun los barómetros testificadores, fué de 8,600 metros. Por desgracia, dos de los osados aeronautas,

Sivel y Crocé Spinelli, fueron víctimas de su entusiasmo por la ciencia, pues murieron asfixiados en las altas regiones, á pesar de haber tenido la prevision de llevar consigo varios globitos llenos de oxígeno, con objeto de suplir la insuficiencia de este gas en el aire que se respira á semejantes alturas.

III

LOS GLOBOS CAUTIVOS

Segun hemos visto en el primer artículo de este capítulo, fué un globo cautivo el que sirvió por vez primera para las operaciones militares. El globo de que se valió Coutelle en Maubeuge, en Fleurus y en Maguncia estaba retenido á unos 500 ó 600 metros de altura por dos sistemas de cuerdas que sujetaban dos grupos de *aerosteros.* Desde el puesto casi fijo que el globo ocupaba, el aeronauta y el jefe militar que le acompañaba podian observar á su grado los movimientos del enemigo, hacer señales al cuartel general ú observar las que desde éste

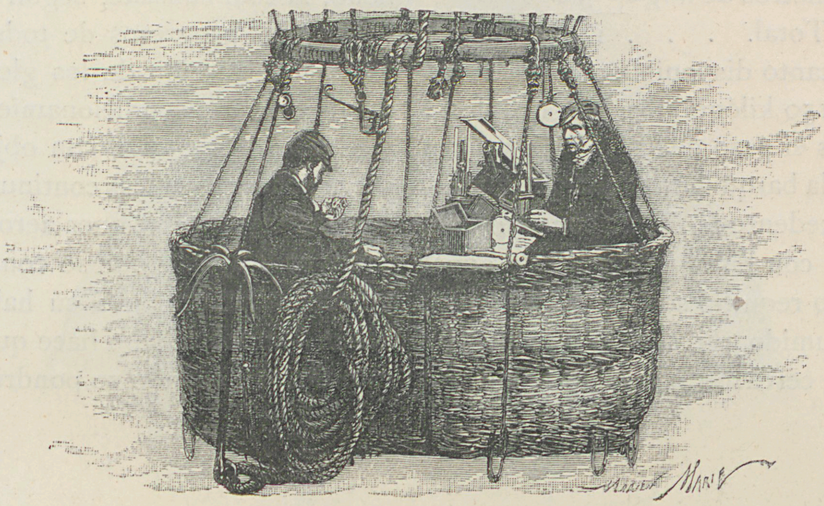


Fig. 257.—Barquilla de M. Glaisher

se les hacian. El trasporte del esquife aéreo de un punto á otro, se efectuaba sencillamente, aunque no sin riesgo de percances ó averías. Coutelle habia adaptado veinte cuerdas al ecuador de su globo, cada una de las cuales estaba sujeta por un soldado. Miéntras se viajaba, manteníase el globo á escasa altura, pero la suficiente para esquivar los obstáculos naturales á lo largo del camino.

Claro está que tan sencillas disposiciones serian insuficientes para manejar un globo cautivo que se quisiera mantener por espacio de bastante tiempo en el mismo sitio, como por ejemplo si se le quisiera utilizar para hacer observaciones meteorológicas de alguna duracion.

Hoy, gracias á M. Giffard, ha hecho grandes progresos el arte de construir esta clase de globos, de manejarlos con facilidad y de verificar frecuentes ascensiones. Preocupado aquel ilustrado ingeniero con las dificultades prácticas que faltaban aún por vencer, ántes de construir el globo dirigible que hemos descrito y con el cual hizo en 1852 y 1855 dos experimentos, aprovechó la ocasion de las grandes solemnidades de las exposiciones universales para dedicarse á estudiar minuciosamente el asunto.

En 1867 y 1869 se hicieron muchas ascensiones en Paris y en Lóndres en un globo cautivo; pero en la exposicion de 1878 se pudo admirar el magnífico globo construido por monsieur Giffard; entónces se hicieron miles de ascensiones y tambien al año siguiente. Por desgracia el viento dió tales sacudidas, durante una tempestad, al globo desinflado en parte, que lo hizo pedazos, aunque por fortuna sin tenerse que lamentar más desgracia que la pérdida material causada por tan enojoso contratiempo.

Hé aquí algunos detalles interesantes sobre sus dimensiones:

La esfera que lo formaba tenia 36 metros de diámetro, y cuando estaba enteramente lleno de hidrógeno, su capacidad interior era de 25,000 metros cúbicos. Como la fuerza de ascension era próximamente de un kilógramo por metro cúbico, representaba una cifra total de 25,000

kilógramos. Véase cómo se distribuia tan enorme fuerza:

El globo, cuya envolvente estaba formada por dos lienzos unidos entre sí por una hoja de cautchuc, y despues por una pieza de muselina barnizada con goma laca con varias capas de pintura al óleo,

pesaba con sus dos válvulas. .	5,000 kilógs.
La red y las cuerdas.	4,500 —
La barquilla y sus accesorios. .	1,600 —
El cable-contrapeso.	450 —
El cable de 600 metros de largo	3,000 —
Total. . . .	14,850 kilógs.

Quedaba por tanto disponible una fuerza ascensional de 10,150 kilógramos. Calculando en 4,000 kilógramos el peso de los 50 viajeros que podian caber en la barquilla, resulta que quedaba todavía un excedente de fuerza considerable. El henchimiento con hidrógeno puro de aquel coloso aerostático requirió solamente tres dias, habiéndose consumido 180,000 kilógramos de ácido sulfúrico y cerca de 9,000 de limaduras de hierro. Dos máquinas de 300 caballos hacian funcionar la cábria en la cual se enrollaba y desenrollaba el cable á cada ascension.

Las cifras que acabamos de estampar permitirán juzgar del enorme gasto que ha causado la construccion de la instalacion de semejante globo, que no tenia otro objeto aparente sino el de satisfacer la curiosidad de los numerosos forasteros atraidos á Paris por la Exposicion y excitar su entusiasmo por el arte aeronáutico. Pero de esta empresa se ha reportado otra utilidad, la cual consiste, segun hemos dicho ántes, en los progresos de toda clase realizados en la construccion de los globos y en los mil detalles de su acondicionamiento.

Es de desear que, con objeto de hacer observaciones científicas continuadas y metódicas, se construyan estaciones aerostáticas de globos cautivos ó fijos, y que se confie su direccion á personas que reunan á su habilidad técnica el saber. Mucho tiempo hace que se ha formulado este deseo: ¿cuándo se pondrá en ejecucion?

EL SONIDO



Fig. 258.—Chladni

PRIMERA PARTE

LOS FENÓMENOS Y LAS LEYES DEL SONIDO

Los fenómenos estudiados en la primera parte de este volúmen se hacen patentes en todos los cuerpos (llamados por esta razon *ponderables*) de un modo continuo. Y en efecto, ninguna partícula de materia se exime, ni en el tiempo ni en el espacio, de la influencia de la fuerza de gravitacion, ó, por lo que más particularmente atañe al globo terráqueo, de la influencia de la gravedad.

Los fenómenos que vamos á describir en esta segunda rama de la Física no tienen ya ese carácter de universalidad ó de permanencia: los fenómenos sonoros son puramente accidentales. No ocurren si las moléculas de los cuerpos no se conmueven de una manera especial, que en rigor no exige la intervencion de ninguna fuerza *sui generis;* tampoco sobrevienen si, además de esto, la conmocion que los constituye no llega á comunicarse eficazmente á uno de nuestros sentidos, el del oído. Con todo, hánse puesto en evidencia las leyes de estos movimientos moleculares y de su propagacion por medio de tales métodos de observacion que un sordo podria comprobarlos casi todos, si no tan fácil al ménos tan seguramente como un físico que estuviese en pleno goce de sus facultades auditivas. Sin embargo, esta observacion no es cierta sino en cuanto se aplica á la parte objetiva ó puramente física de los fenómenos, y el cuadro que vamos á trazar de los del sonido en la naturaleza seria incomprensible para el que estuviera privado desde la cuna del sentido del oído.

CAPITULO PRIMERO

PRODUCCION Y PROPAGACION DEL SONIDO

I

LOS FENÓMENOS DEL SONIDO EN LA NATURALEZA

La carencia de todo sonido, de todo ruido, en una palabra, el silencio absoluto es para nosotros sinónimo de inmovilidad y de muerte. Estamos tan acostumbrados á oir, áun cuando sólo sea el ruido que hacemos nosotros mismos, que difícilmente podemos concebir la idea de un mundo completamente silencioso, como parece ser el de la Luna.

Los fenómenos del sonido se manifiestan en la Tierra en todos los instantes de la duracion. Es indudable que por este concepto media una gran diferencia entre nuestras ciudades populosas con sus mil ruidos que nos atruenan constantemente los oídos, y el murmullo suave y confuso que se percibe en las campiñas. ¡Qué contraste tambien entre la calma de las regiones alpestres ó polares en que desaparece hasta el menor asomo de vida, y las estruendosas playas del Océano! Allí tan sólo rompe el silencio el sordo fragor de los aludes, el crujido de los hielos ó el áspero mugido de los vendavales. El estampido prolongado del trueno, tan sonoro en las llanuras, no se percibe en las crestas de las montañas elevadas; en lugar de esa detonacion terrible, que por lo regular caracteriza á las descargas eléctricas y cuya repercusion multiplica su duracion, es un golpe seco, semejante á la explosion de un arma de fuego. Por el contrario, á orillas del mar, ensordece el oído el continuo estrépito del oleaje que se estrella sobre las rocas, y el bramido sordo, uniforme que con diapason bajo y solemne acompaña á las notas agudas producidas por las olas al chocar con la arena y las guijas: cuando estalla un temporal, este mugido sordo se convierte en espantosa discordancia.

En medio de los campos, en los bosques, la sensacion es totalmente distinta. Óyese un susurro vago formado por la reunion de mil sonidos de variedad infinita; ora es la yerba que tiembla á impulsos de la brisa, ó los insectos que vuelan ó se arrastran, ó las aves cuya voz se pierde en el espacio; ya es el ramaje de los árboles que se agita al hálito de leve céfiro, ó se encorva y se troncha al embate del proceloso viento. De todo esto resulta una armonía, unas veces alegre, otras grave y otras terrible (1), muy diferente del bullicio atronador que reina en las calles populosas de las grandes ciudades. Las corrientes, los rios, los riachuelos y los torrentes unen sus notas á este concierto; y en los terrenos accidentados domina el sonoro rumor de las cascadas al despeñarse, y á veces tambien el fragoroso estruendo de los aludes que lo destruyen y sepultan todo á su paso.

Pero de todos los ruidos naturales, los más continuos y violentos son los que nacen y se propagan en el seno de la atmósfera; las masas gaseosas, arrastradas por un movimiento irresistible que cualquier diferencia de temperatura ó de densidad basta para engendrar, chocan con todos los obstáculos que les oponen las desigualdades del terreno, las montañas, las rocas, los bosques, los árboles aislados, y tan pronto silban como braman furiosamente. Y si la electricidad se mezcla con ellos, el estrépito es mucho mayor: entónces los terroríficos estampidos del trueno se sobreponen á todos los

(1) Al describir M. Candéze las luchas que traban las fieras tan luégo como se ha puesto el sol y van en busca de una presa, habla del «ruido súbito, terrorífico, indefinible que, en las regiones ecuatoriales, estalla de pronto en lo profundo de las selvas.»

demás ruidos y los apagan. Las explosiones de los volcanes y los terremotos son las únicas que rivalizan en pujanza con esa formidable voz de la naturaleza. Al ocurrir la catástrofe que destruyó á Riobamba en 1797, resonó una inmensa detonacion en el valle donde se asientan las ciudades de Quito é Ibarra, siendo lo más particular del caso que no se oyó en el mismo lugar del desastre. El levantamiento ó aparicion del Jorullo en 1759 fué precedido de mugidos subterráneos que duraron dos meses enteros (Humboldt).

Para completar este cuadro de los sonidos que se producen naturalmente en el suelo y en la atmósfera, réstanos hacer mencion de las detonaciones que acompañan á la caida de los meteoros cósmicos, como aerolitos y bólidos. Por lo regular estas explosiones ocurren á grandes alturas, y las personas que de ellas han sido testigos las comparan á descargas de artillería, ó bien al ruido que producen los carros muy cargados al chocar sus ruedas con las desigualdades del empedrado, ó ya tambien al prolongado estampido del trueno.

Pero los fenómenos del sonido que más nos interesan son los que el hombre y los animales producen con el auxilio de órganos especiales: la voz humana, intérprete indispensable de nuestras ideas, de nuestros sentimientos (1); los gritos, los cantos de los animales, que expresan de un modo imperfecto y tosco las variadas impresiones que sienten, sus necesidades, sus alegrías, sus dolores. El hombre ha creado un arte, el más poderoso de todos, el de la música, para expresar lo que el lenguaje articulado no puede traducir; y para realzar áun más los dones de la naturaleza, ha sabido multiplicar con el auxilio de variadísimos instrumentos los recursos de su propia voz. Los sonidos producidos con este objeto especial tienen propiedades físicas características que los distinguen de los ruidos irregulares, discontinuos, indefinibles, que hemos descrito hasta aquí; esos sonidos forman una serie ordenada, regular, áun cuando se prescinda de la composicion que, en una obra musical, hace que se sucedan en un órden inteligente con arreglo á un ritmo marcado, y los combina en melodiosos acordes. Esta serie constituye los sonidos musicales, cuyo estudio es el objeto principal de la Acústica.

Cierto es que las necesidades del trabajo y de la industria humana han obligado al hombre á producir otros muchos ruidos que no se recomiendan ni por la melodía ni por la armonía, pero que en su mayoría son inseparables de los trabajos que los engendran, y participan, por decirlo así, de su carácter de utilidad. En las fábricas y talleres, en las fundiciones, el ruido de martillos, sierras y herramientas de toda clase, y de las máquinas de vapor, no cesa á menudo ni de dia ni de noche, constituyendo un concierto nada armonioso, y sin duda alguna desagradable para los oídos ménos delicados. Pero ¿qué remedio? Para nosotros es tambien una música preferible de todo punto á la de la fusilería y del cañon en los campos de batalla, así como la lucha en el terreno del trabajo y de la ciencia vale en nuestro concepto mucho más que las decisiones brutales de la fuerza.

Todos los fenómenos que acabamos de mencionar, por variados que parezcan, se refieren á un mismo modo de movimiento, al movimiento vibratorio, y afectan particularmente al órgano del oído, produciendo en nosotros la sensacion del sonido. Ahora pasaremos á estudiar la naturaleza de las vibraciones sonoras, á indicar las relaciones que existen entre estas vibraciones y las sensaciones auditivas, y por último, á formular las leyes á que unas y otras obedecen.

II

EL SONIDO ES UN FENÓMENO EXTERIOR É INTERIOR Á LA VEZ

El sonido es una sensacion percibida por medio del órgano del oído, y cuya causa exterior consiste en cierto movimiento molecular de los cuerpos.

La produccion del sonido supone, pues, necesariamente, por una parte un fenómeno exterior, y por otra un objeto sensible que per-

(1) «Los fenómenos sonoros adquieren grande importancia, considerados desde el punto de vista de las relaciones del hombre con el mundo ambiente. Por medio del sonido se pone el hombre en comunicacion regular y seguida con sus semejantes. La *palabra* es el atributo más elevado, el más poderoso medio de accion del hombre; el estudio de la acústica nos permitirá penetrar el mecanismo mediante el cual llega el hombre á dar á su pensamiento una forma precisa, perceptible, á traducirlo en palabras. Este estudio nos demostrará tambien cómo y por qué mecanismo llega el hombre á apreciar, en sus infinitas variedades, las palabras pronunciadas por sus semejantes, á conocer sus pensamientos.» (Gavarret, *Fenómenos físicos de la fonacion y de la audicion.*)

cibe su impresion. El fenómeno exterior es el cuerpo sonoro en accion, el orígen ó fuente del sonido, que, en condiciones y circunstancias particulares, ocasiona fuera de nosotros un movimiento especial; movimiento que propagándose desde el cuerpo sonoro al oído, excita nuestros nervios, produciendo así la sensacion auditiva. Naturalmente el sonido se extingue cuando desaparece una ú otra de las condiciones que lo han ocasionado. Si el cuerpo sonoro está en reposo, no hay sonido; no lo hay si el nervio auditivo está paralizado ó inerte, y por último, tampoco lo hay cuando no existe algun intermediario material que sirva de medio de comunicacion entre el oído y el cuerpo agitado.

Partiendo, pues, de estas consideraciones se podria dividir la *Acústica* ó ciencia del sonido, en dos partes distintas: en la una se estudiaria el sonido con arreglo á los fenómenos exteriores que lo producen, prescindiendo de la accion que ejercen en nuestros sentidos, ó si en este estudio se hiciese intervenir la sensacion, seria únicamente como medio, como procedimiento de investigacion: esta primera parte de la Acústica podria llamarse *Acústica física*. En la otra parte, que seria la *Acústica fisiológica*, se trataria de las leyes de las sensaciones auditivas; es decir, del sonido al llegar al oído, de las modificaciones que la conmocion sonora produce en este órgano, del cometido de las distintas partes del mismo, y finalmente, de la comparacion de las sensaciones de por sí, que más particularmente se tomasen en consideracion. Se podria caracterizar estas dos ramas de la Acústica diciendo, que la *Acústica física* tiene por objeto el *sonido fuera del hombre*, y la *fisiológica, el sonido en el hombre* (1). Tambien podria hacerse la misma distincion, planteando, por ejemplo, las dos cuestiones siguientes:

Al sonar una campana, ¿qué sucede en la materia que la constituye y en el aire que nos separa de ella? ¿Qué ocurre en nuestro oído y en nosotros mismos?

Los fenómenos de la luz y del calor dan lugar á una distincion semejante: una cosa es el movimiento ondulatorio que emana del foco incandescente, y otra el efecto perceptible que dicho movimiento produce en nuestros órganos. Si impresiona la retina, la sensacion es luz; y es calor, cuando sólo afecta los nervios diseminados por la superficie epidérmica. Además, hay ondas que siendo impotentes para impresionar la retina, por no ser bastante rápidas las vibraciones que las engendran, afectan sin embargo el sentido del tacto; por el contrario, si su rapidez traspasa cierto límite, el ojo no las ve, pero su accion cobra otra forma y produce fenómenos químicos en los cuerpos vivos. Por este concepto, el sonido tiene tambien una ostensible analogía con el movimiento ondulatorio del medio etéreo, y en efecto, ya tendremos ocasion de ver que el movimiento que lo produce no da en realidad orígen á una sensacion auditiva sino dentro de ciertos límites de rapidez ó de intensidad. Si la conmocion sonora es demasiado lenta, no puede excitar el órgano del oído; si demasiado rápida, traspasa igualmente en sentido contrario el límite de nuestra impresionabilidad (2).

Empecemos por enumerar los varios modos prácticos que nos enseñan cómo puede producirse el sonido. En seguida veremos cómo se propaga éste de los cuerpos sonoros á través de los gases, de los líquidos y áun de los sólidos, hasta nuestro oído.

III

DIFERENTES MODOS DE PRODUCIRSE EL SONIDO

La *percusion*, ó sea el choque de dos cuerpos entre sí, es uno de los modos más comunes de

---

(1) Helmholtz se expresa del modo siguiente acerca de este asunto en su *Teoría fisiológica de la música*:

«Hasta ahora, dice, no se ha tratado detalladamente de la ciencia de los sonidos sino en cuanto se refiere á su parte física, es decir, se ha estudiado los movimientos de los cuerpos sonoros, sólidos, líquidos y gaseosos cuando llevan al oido algun sonido perceptible. Esta acústica física no es en esencia otra cosa más que una subdivision de la teoría de los movimientos de los cuerpos elásticos..... Los tratados de física suelen contener un capítulo aparte sobre la acústica, separado de la teoría de la elasticidad, á la cual deberia pertenecer por la naturaleza de las cosas, pero que sólo tiene su razon de ser en la circunstancia de que el oído ha sido orígen de descubrimientos y métodos de observacion de índole particular. Junto á la acústica física, hay otra fisiológica, cuyo objeto es el estudio de los fenómenos que ocurren en el oído mismo.» Tambien se podria establecer una tercera parte de la ciencia de los sonidos, que vendria á ser la consecuencia de las dos primeras y llamarse *Acústica musical*. La obra del sabio aleman, de la que hemos copiado la nota precedente, trata precisamente de esta parte.

(2) Al estudiar la gravedad, no hemos tenido ocasion de hacer una distincion de este género, pues tan sólo hemos encontrado fenómenos de equilibrio, de movimiento y tambien de presion, cuya manifestacion patente no necesita un órgano especial de percepcion, como el oído lo es para los sonidos y ruidos, y la vista para la luz y los colores.

produccion del sonido. El martillo que da golpes sobre el yunque, el badajo que hace sonar las campanas ó los timbres, los palillos del tambor, los platillos, y otros cien ejemplos que el lector recordará fácilmente, son otros tantos casos particulares en que el sonido resulta del choque de dos cuerpos sólidos. De este modo se pueden producir los ruidos y sonidos más variados, pero ya veremos que esta variedad depende á la vez de la forma y de la naturaleza del cuerpo sonoro, y del modo cómo el rumor se propaga hasta nuestros oídos. En el experimento del martillo de agua (pág. 38) el ruido procede del choque de una masa líquida contra un cuerpo sólido.

El *roce* ó *frotamiento* es otro modo de produccion del sonido: merced á él se hacen resonar las cuerdas tirantes con un arco cuyas crines están untadas de una resina llamada colofana; de este modo se producen los sonidos del violin y de otros instrumentos parecidos, y tambien los de las campanas de vidrio ó de metal. En este caso, el frotamiento es trasversal. Pero tambien se arrancan sonidos de las cuerdas ó de las varillas metálicas mediante un frotamiento longitudinal. Cuando se arrastra un objeto por el suelo, por las piedras, por la madera, etc., resulta un sonido producido por el roce; la rueda de un carruaje que corre por el empedrado ocasiona un ruido que se debe en gran parte al roce, pero en el que tambien entra por algo la percusion.

La *pulsacion* de una cuerda tirante, como las de la guitarra, arpa, mandolina y otros instrumentos, engendra un sonido que participa á la vez de la percusion y del roce.

Los cuerpos sólidos y líquidos puestos en contacto mediante una ú otro, producen sonidos ó ruidos; estos mismos movimientos los originan tambien en los líquidos, sin necesidad de que medie ningun cuerpo sólido; tal es por ejemplo el murmullo que resuena cuando caen gotas de lluvia en la superficie del agua de un estanque ó de un rio.

En breve veremos más detalladamente que el sonido resulta en los gases de una serie de condensaciones y dilataciones alternativas; pero estos movimientos pueden proceder de la percusion y del roce. Así por ejemplo, el aire silba cuando se le da un impulso violento con una varilla ó un látigo, y el viento produce sonidos intensos cuando sopla contra los árboles, las casas y cualesquiera otros obstáculos sólidos. Por lo que hace al ruido del viento que penetra en las chimeneas, tiene por causa una especie de conmocion del aire que estudiaremos al tratar de los sonidos producidos por los gases en los tubos. Este sonido es el que emiten los instrumentos de música conocidos con el nombre de *instrumentos de viento*, y tambien

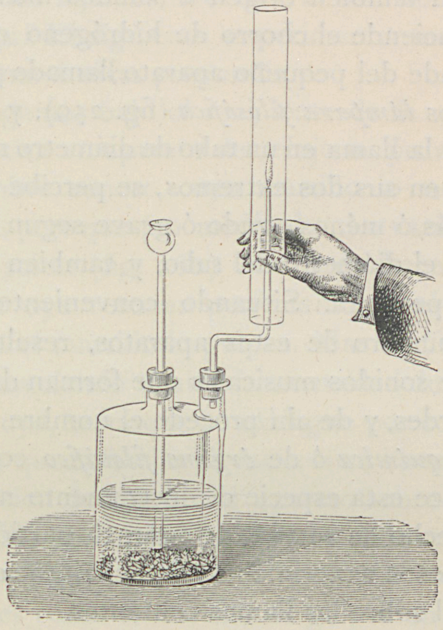


Fig. 259. — Experimento de la armónica química

el de la voz humana, y los gritos de los animales.

Las explosiones del gas, el fragor que acompaña á la chispa eléctrica, los estampidos del trueno, son otros tantos sonidos engendrados por bruscos cambios de volúmen, por dilataciones y contracciones sucesivas de las masas gaseosas.

Uno de los modos más curiosos de producirse el sonido, es el que resulta del contacto de dos cuerpos sólidos de temperaturas diferentes. Schwartz, inspector de una fundicion sajona, fué el que por primera vez llamó la atencion en 1805 acerca de tan singular fenómeno. Habiendo puesto sobre un yunque frio un lingote de plata de temperatura elevada, admiróse de oir sonidos musicales miéntras duró el enfriamiento de la masa. En 1829, Arturo Trevelyan puso por casualidad un hierro de soldar muy caliente sobre una masa de plomo, y al punto brotó del hierro un sonido agudo. Esto le in-

dujo á estudiar el fenómeno y á idear instrumentos á propósito para poner en evidencia esta causa de produccion del sonido: en breve los describiremos, al estudiar las vibraciones sonoras.

El paso de una corriente eléctrica hace resonar una barra de hierro suspendida por su parte media, y uno de cuyos extremos está en el centro de un carrete de induccion.

Por último, la combustion de los gases en los tubos da tambien orígen á sonidos musicales. Si se enciende el chorro de hidrógeno que se desprende del pequeño aparato llamado por los químicos *lámpara filosófica* (fig. 259), y se introduce la llama en un tubo de diámetro mayor, abierto en sus dos extremos, se percibe un sonido más ó ménos agudo ó grave segun la longitud y el diámetro del tubo, y tambien segun su temperatura. Situando convenientemente cierto número de estos aparatos, resulta una serie de sonidos musicales que forman diferentes acordes, y de ahí procede el nombre de *armónica química* ó de *órgano filosófico* con que se conoce esta especie de instrumento músico. Este hecho ha servido de punto de partida para los curiosos experimentos de Schaffgotsch y de Tyndall sobre las llamas cantantes.

De los hechos que preceden resulta en primer lugar una consecuencia: la de que el sonido necesita para producirse cierto movimiento de las moléculas de los cuerpos, un estremecimiento que no siempre percibe la vista, pero sí con frecuencia el tacto, cuando se pone la mano ó el dedo sobre el cuerpo sonoro. Y valiéndonos del lenguaje científico, diremos que los sonidos y los ruidos no son otra cosa sino sensaciones producidas por vibraciones periódicas de los cuerpos, cuando estas vibraciones llegan á adquirir cierto grado de velocidad y de amplitud. Acabamos de ver que hay ciertos modos de suscitar dichas vibraciones: la propiedad de los cuerpos que las hace posibles es sólo una, la que se conoce en física con el nombre de *elasticidad.*

IV

LOS CUERPOS SONOROS

Tenemos, pues, que los cuerpos capaces de emitir sonidos, de *resonar*, empleando una expresion familiar y exacta á la vez, cuando se les somete á una percusion, á un frotamiento, etc., son los que en cierto grado están dotados de elasticidad. Los metales, el cristal, la madera de estructura fibrosa son los que poseen más marcada sonoridad entre los sólidos; pero esta propiedad depende en gran manera de la forma y dimensiones de la masa resonante. Un trozo de acero de forma cúbica despedirá un sonido opaco, sordo, cuando se descarga sobre él un martillazo; pero este sonido será más intenso si se suspende dicho trozo por uno de sus puntos y se aplica el martillazo á cierta distancia del punto de suspension; el mismo pedazo de metal, trasformado en una varilla cilíndrica un tanto larga, despedirá sonidos más intensos mediante el frotamiento ó el choque. Pero su sonoridad será mucho mayor, si se le da la forma de vasija hemisférica, de campana ó de timbre. En resúmen, la sonoridad está en razon directa de la elasticidad.

Los líquidos y los gases son cuerpos elásticos, por lo cual pueden emitir sonidos, segun hemos visto ántes. Débeseles pues incluir entre los cuerpos sonoros, pero la propiedad que más habremos de considerar en ellos es la que poseen de trasmitir los sonidos emanados de los sólidos, sin que por ello dejemos de consignar su aptitud para engendrar á su vez sonidos. Los líquidos y los gases son medios trasparentes para el sonido, del propio modo que lo son para la luz, siquiera esto no signifique que la trasparencia sonora dimane de la misma causa que la luminosa.

Los cuerpos no elásticos ó dotados de escasa elasticidad, los cuerpos blandos, resuenan por lo comun muy mal; por ejemplo, un pedazo de cera ó de greda un poco húmeda. Por la misma razon, estos cuerpos son malos conductores del sonido; lo interceptan ó lo apagan. Relativamente á la trasmision del sonido son análogos á los cuerpos opacos con relacion á la luz.

Las materias sumamente divididas, como la pluma, la lana ó el algodon, tienen de por sí muy poca ó ninguna sonoridad, y trasmiten mal el sonido, y por esto se llenan de aserrin, de virutas ó de yeso los espacios que median entre los techos y pavimentos cuando se quiere amortiguar el ruido de un piso á otro. Los tapices, las cortinas, las colgaduras hacen á una habitacion mucho ménos sonora, más sorda, porque

son cuerpos poco á propósito para repercutir los sonidos.

Hé aquí pues formulada una consecuencia no ménos importante que la del artículo III, cual es la de que los cuerpos sonoros son los elásticos, es decir, aquellos cuyas moléculas, sacadas de su posicion de equilibrio por una accion exterior, vuelven á ella, la traspasan y oscilan así más ó ménos tiempo. Por consiguiente, desde ahorá podemos ya considerar que el sonido tiene su orígen en un movimiento vibratorio de las moléculas de los cuerpos sólidos, líquidos ó gaseosos.

V

EL SONIDO NO SE PROPAGA EN EL VACÍO

Nadie ignora que el sonido invierte un espacio de tiempo apreciable en propagarse desde el cuerpo sonoro al órgano del oído. Cuando vemos á alguna distancia una persona que da un martillazo, por ejemplo, nuestros ojos ven cómo cae el martillo sobre el obstáculo ántes que el oído perciba el sonido de la percusion. Del propio modo, el estampido de un fusil, de un cañon llega á nuestros oídos despues que hemos columbrado el fulgor de la llama producida por la explosion. Cuando se disparan fuegos artificiales, vemos cómo estallan los cohetes en el espacio y cómo se difunden y apagan los chorros luminosos, ántes de oir el ruido que acompaña á la explosion.

Recuerdo haber admirado en las costas del Mediterráneo el curioso espectáculo de un buque de guerra que hacia ejercicio de cañon; veia el humo de los disparos y en las crestas de las olas los rebotes de las balas que iban á perderse en el mar, mucho tiempo ántes de oir el estampido del cañon.

En todos estos casos, el intervalo comprendido entre la vista del fenómeno y la audicion del sonido, marca la diferencia entre la velocidad de este y la de la luz; pero como la de la segunda comparada con la del primero puede considerarse como infinita (1), el mismo intervalo marca, sin error apreciable, el tiempo que el sonido invierte en propagarse de un punto á otro. La observacion demuestra tambien que el intervalo á que nos referimos aumenta con la distancia.

Así pues, el sonido se propaga sucesivamente, y en breve veremos con cuánta velocidad. Pero ¿cuál es el medio que sirve de vehículo á este movimiento? ¿Es el suelo? ¿Se comunica sirviéndole de intermediarios los cuerpos sólidos, ó los líquidos, ó el aire, ó bien todos ellos á la vez? El siguiente experimento servirá de respuesta á estas preguntas.

Pongamos bajo el recipiente de la máquina neumática un aparato de relojería provisto de un timbre sonoro, cuyo martillo lo sujeta un muelle, pero que por medio de una varilla se le puede soltar (fig. 260). Antes de hacer el vacío, se oye resonar perfectamente el timbre cuando el martillo lo golpea. Mas conforme se va enrareciendo el aire, la intensidad del sonido disminuye, hasta que se extingue por completo cuando queda hecho el vacío, si se ha tenido la precaucion de colocar el aparato sobre una almohadilla de corcho, de algodon ó de cualquier materia blanda y poco ó nada elástica. Vése entónces cómo el martillo da golpes en el timbre, pero sin percibirse ningun ruido, ningun sonido. Si se introduce entónces en el recipiente, en lugar del aire que contenia, un gas cualquiera, como hidrógeno, ácido carbónico, oxígeno, vapor de éter, etc., se oye de nuevo el sonido.

Se puede hacer la misma prueba con otro aparato más sencillo, que consiste en un globo de cristal, provisto de dos llaves, y que puede adaptarse á la máquina neumática (fig. 261). En el interior de este globo está suspendida de unos hilos sin retorcer una campanilla que se agita sacudiendo el globo con la mano; si en éste se ha hecho el vacío, la campanilla no suena. Introduciendo entónces por el embudo de la parte superior unas cuantas gotas de un líquido volátil, redúcese éste á vapor penetrando en el espacio vacío del globo sin que el aire pueda mezclarse con él, y se ve que los vapores trasmiten el sonido como los gases, porque entónces el sonido de la campanilla resuena de nuevo. Los experimentos de M. Biot han demostrado que el sonido trasmitido es tanto más

(1) Séneca habia adivinado en parte esta verdad experimental: «Vemos el relámpago, dice, ántes de oir el estampido del trueno, porque siendo el sentido de la vista más rápido, se anticipa mucho al del oído.» (*Quæst. natur.*, II, 12.) Pero el filósofo latino incurre en un error atribuyendo á nuestros sentidos una propiedad que pertenece á los fenómenos exteriores, á las ondas luminosas y á las ondas sonoras.

intenso, á igualdad de presion, cuanto mayor sea la densidad de los gases ó vapores.

Pero esta propiedad difiere mucho entre dos gases. El hidrógeno trasmite el sonido con intensidad mucho menor que el aire reducido á igual grado de enrarecimiento. En una de sus interesantes lecciones dadas en el Instituto real, describe Tyndall en los siguientes términos la singular accion del hidrógeno sobre la voz: «La voz se forma, dice (y así lo veremos más adelante) por la inyeccion del aire de los pulmones en un órgano llamado *laringe*. A su paso al través de este órgano, las cuerdas vocales lo ponen en vibracion, resultando así el sonido. Pues bien, si se llenan los pulmones de hidrógeno y se quiere hablar, las cuerdas vocales imprimen tambien su movimiento al hidrógeno, que lo trasmite al aire exterior; pero esta trasmision de un gas ligero á otro mucho más pesado tiene por consecuencia el disminuir de un modo notable la fuerza del sonido. Es un efecto verdaderamente curioso. Ya conoceis la fuerza y el timbre de mi voz. Pues si expulso el aire de mis pulmones, los lleno de hidrógeno aspirado en ese recipiente, y me esfuerzo en hablar alto, mi voz pierde gran parte de su

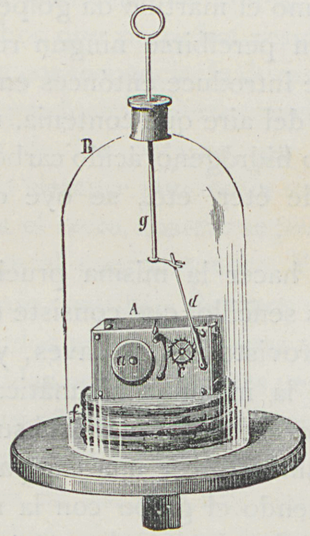


Fig. 260.—Aparato para demostrar que el sonido no se propaga en el vacío

fuerza, y su timbre no es el mismo. Es una voz ronca y cavernosa, que no parece humana, ni siquiera propia de este mundo. No puedo describirla de otro modo.»

Un siglo atrás, no estaban todos los físicos enteramente convencidos por los experimentos hechos en el vacío de que el aire fuese el vehículo del sonido; en su concepto, faltaba probar que el movimiento capaz de engendrar el sonido no quedaba anulado en el cuerpo sonoro por el mismo vacío que le rodeaba. Véase lo que con tal motivo dice Hauksbee, así como los nuevos experimentos que ideó para poner esta circunstancia fuera de toda duda, y que hizo en 1705 ante la sociedad real de Lóndres:

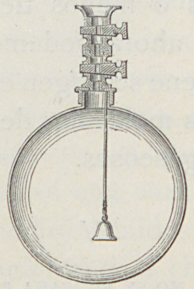


Fig. 261.—El sonido no se propaga en el vacío

«Parece que los experimentos hechos hasta el dia sobre el sonido en el vacío no demuestran suficientemente que la pérdida de aquel procede tan sólo de la carencia de aire, y áun creo que no se puede asegurar así si no se hacen nuevas pruebas. Trátase de averiguar si las partes del cuerpo sonoro, en un medio como el vacío, no cambian hasta el punto de no poder recibir ya el movimiento necesario para producir el sonido. Como esta cuestion merece ser tratada con detenimiento, he ideado la siguiente prueba:

»He metido en un recipiente de alguna resistencia y rodeado en su parte inferior de un aro de cobre, una campana de regular tamaño y grueso, sujetando el orificio del recipiente sobre una plancha de cobre por medio de un disco de cuero humedecido colocado entre otros dos. De esta suerte el recipiente estaba lleno de aire comun que no podia escaparse por ninguna parte. Púsele en seguida en la máquina neumática, le cubrí con otro recipiente mayor, y extraje el aire contenido entre uno y otro.

»Al hacer este experimento, estaba seguro de que cuando el badajo diese un golpe en la campana, resultaria un sonido en el recipiente interior, en el cual el aire tenia el mismo grado de intensidad que el de la atmósfera, y que no experimentaria alteracion alguna por el vacío que quedaba fuera de él entre los dos recipientes.

»Cuando hube terminado los preparativos

del experimento, hice que el badajo diese un golpe en la campana, pero el sonido no se trasmitió al través del vacío, áun cuando me cercioré de que al propio tiempo se produjo sonido en el recipiente.»

Como se ve, este experimento era sobrado decisivo y concluyente.

VI

LOS SÓLIDOS, LOS LÍQUIDOS Y LOS GASES SON CONDUCTORES DEL SONIDO

Resulta, pues, que el aire y todos los gases en general son vehículos del sonido, y los que lo conducen desde el cuerpo sonoro al oído. Pero no todos ellos poseen esta propiedad en el mismo grado. Segun los experimentos de Tyndall, la conductibilidad del gas hidrógeno para el sonido es mucho menor que la del aire á igualdad de presion, y sin embargo la velocidad de propagacion es en dicho gas cuádruple de lo que lo es en el aire. En el siglo pasado hizo Hauksbee experimentos sobre la propagacion del sonido en el aire condensado hasta cinco atmósferas. La intensidad del sonido trasmitido resultó tambien gradualmente aumentada.

Los sólidos no dejan de trasmitirlo, pero en proporcion muy varia y que depende de su elasticidad. Así por ejemplo, si en los experimentos anteriores y despues de hecho el vacío, se aplica el oído, percíbese un sonido muy tenue, trasmitido al aire circundante por los discos de cuero y el platillo de la máquina. Lo que prueba aún más la certeza de esta trasmision por los sólidos, es que el sonido de la campana sólo se debilita un tanto si se pone directamente el aparato sobre la platina de vidrio que sustenta la campana (1).

Finalmente, el agua y en general todos los líquidos son tambien vehículos del sonido, y tanto por lo que respecta á la intensidad como á la rapidez, mucho mejores que el aire. Los buzos oyen debajo del agua los ruidos más tenues, por ejemplo, los que producen los guijarros al rodar y al chocar unos con otros. En un principio se puso en duda si el sonido que se percibia á pesar de la interposicion de cierta masa de agua tenia efectivamente este líquido por vehículo; y se pensó que tal vez fuese el aire disuelto en él el que trasmitiese al exterior las vibraciones sonoras. El abate Nollet reprodujo los experimentos de Hauksbee, tomando

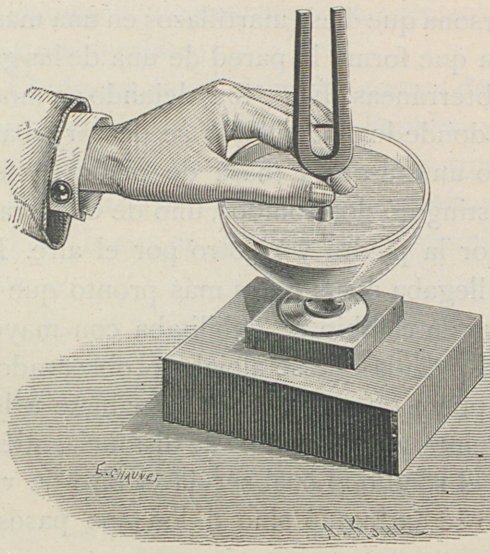


Fig. 262. —Conductibilidad de los líquidos para el sonido

la precaucion de extraer el aire del agua en la cual se propagaba el sonido, y no halló diferencia apreciable entre el producido por el cuerpo sonoro metido en agua con ó sin aire.

Así pues, para la propagacion del sonido no es indispensable que haya aire en el agua, ni tampoco aumenta ó disminuye su intensidad.

Un experimento muy sencillo demuestra la conductibilidad de los líquidos para el sonido. Se frota un diapason con un arco de violin, y se observa que el sonido producido y comunicado por el aire solo es muy débil y apénas perceptible. Si se introduce el pié del instrumento en una vasija llena de agua (fig. 262), el sonido adquiere más fuerza, sobre todo si además se coloca la vasija sobre una caja de madera vacía. La conmocion sonora se comunica entónces directamente por medio del agua al cristal de la vasija y á la madera de la caja.

No hay que confundir los sonidos que percibimos por intermedio del aire, con los que nos trasmiten los sólidos, por ejemplo, el suelo, ó

(1) Los académicos de Florencia, que hicieron experimentos sobre la propagacion del sonido en el vacío, creyeron que el aire no era necesario para la propagacion. La causa de su error consistia en lo difícil que á la sazon era obtener un vacío suficientemente perfecto, así como tambien en que no tuvieron la precaucion de aislar el cuerpo sonoro con cuerpos blandos ó malos conductores del sonido. Una imprevision parecida indujo al P. Kirchner á hacer una deduccion distinta, pero no ménos errónea. Habiendo observado que una campanilla seguia resonando en el espacio barométrico, no admitia que este espacio pudiese estar realmente vacío.

cualquier otro cuerpo elástico. Si se aplica el oído al extremo de un madero bastante largo, se percibe muy bien el ruido que produce en el extremo opuesto el roce de un alfiler ó la punta de una pluma: sin embargo, una persona situada hácia la mitad del madero, pero algo apartada de él, no oye nada. El tic-tac de un reloj de bolsillo colgado del extremo de un tubo metálico se oye distintamente en el otro extremo, sin que las personas más inmediatas perciban ruido alguno. «Habiendo bajado Hassenfratz á una de las canteras situadas debajo de Paris, encargó á otra persona que diese martillazos en una masa de piedra que forma la pared de una de las galerías subterráneas. Él se iba alejando en tanto del sitio donde los martillazos se descargaban, aplicando un oído á la masa de piedra; y en breve distinguió dos sonidos, uno de ellos trasmitido por la piedra y el otro por el aire. El primero llegaba á sus oídos más pronto que el otro, pero en cambio se debilitaba con mayor rapidez á medida que se alejaba el observador, hasta el punto de que dejó de percibirse á los ciento treinta y cuatro pasos de distancia, miéntras que el sonido al cual servia el aire de vehículo no se extinguió sino á los 400 pasos.» (Hauy.)

Otros experimentos por el estilo ejecutados con largas barras de madera ó de hierro produjeron el mismo resultado en cuanto á la superioridad de la velocidad, pero un efecto totalmente contrario con respecto á la intensidad. Más adelante citaremos el curioso experimento de Wheatstone, reproducido por Tyndall, merced al cual varias personas situadas en el segundo piso de una casa oyeron, por intermedio de varas de abeto, el concierto que se daba en la planta baja ó en el sótano del edificio. Así pues. la madera es excelente conductora del sonido.

Describiendo Humboldt los ruidos sordos que casi siempre acompañan á los terremotos, cita un hecho que prueba la facilidad con que los cuerpos sólidos trasmiten los sonidos á largas distancias. «En Caracas, dice, en los llanos de Calabozo y en las orillas del rio Apure, afluente del Orinoco, es decir, en una extension de 130,000 kilómetros cuadrados, se oyó una detonacion formidable, pero sin que hubiera sacudidas, en el momento en que vomitaba un torrente de lavas el volcan de San Vicente, situado en las Antillas á 1,200 kilómetros de distancia. Con relacion á esta distancia, viene á ser como si se oyera en el norte de Francia una erupcion del Vesubio. Cuando la gran erupcion del Cotopaxi en 1744, se oyeron detonaciones subterráneas en Honda, á orillas del Magdalena; y eso que entre ambos puntos median 810 kilómetros de distancia, su diferencia de nivel es de 5,500 metros, y están separados por las montañas colosales de Quito, de Pasto y de Popayan, y por valles y barrancos sin cuento. Es indudable que el aire no trasmitió el ruido, sino que lo propagó la tierra á gran profundidad. El dia del terremoto de Nueva Granada en febrero de 1835, ocurrieron los mismos fenómenos en Popayan, en Bogotá, en Santa Marta, en Caracas, donde el fragor duró siete horas enteras, en Haiti, en la Jamaica y á orillas del lago Nicaragua.» (*Cosmos*, I.)

En resúmen, la trasmision del sonido desde el cuerpo sonoro al oído puede efectuarse por medio de los cuerpos sólidos, de los líquidos y de los gases; pero su vehículo más comun es la atmósfera.

De aquí resulta que el sonido no traspasa los límites de la atmósfera, y así por ejemplo, el ruido de las explosiones volcánicas no puede propagarse hasta la Luna, del propio modo que hasta los habitantes de la Tierra no llega el rumor de los sonidos que tal vez se produzcan en los espacios celestes (1), y por consiguiente, las detonaciones de los aerolitos indican que estos cuerpos han penetrado ya en nuestra atmósfera en el momento en que dichas detonaciones ocurren, lo cual puede servirnos de dato para calcular los límites de la capa gaseosa que rodea á nuestro planeta. En las altas montañas, el enrarecimiento del aire es causa de que los sonidos se debiliten sobremanera. Segun de Saussure y todos los exploradores posteriores á él, un pistoletazo disparado en la cumbre del monte Blanco hace ménos ruido que un cohete. «He hecho muchas veces esta prueba, dice

(1) Los pitagóricos creian en una armonía producida por el movimiento de las esferas. Los siete planetas formaban un concierto perfecto, y si los oídos humanos no percibian esos sonidos de orígen celestial, no atribuian esta impotencia á falta de un medio capaz de propagarlos, sino que la achacaban á que estamos ya acostumbrados á ellos desde que nacemos, y que para distinguir dicha armonía, hubiera sido menester el contraste del silencio. Aristóteles combate la hipótesis pitagórica valiéndose de argumentos que no valen mucho más que ella.

Tyndall, la primera con un cañoncito de estaño, y las otras con pistolas, y lo que más me llamó la atencion fué la falta de esa plenitud y de esa limpieza de sonido características de los pistoletazos que se disparan á ménos altura; el estampido producia el efecto del tapon de una botella de Champagne, á pesar de lo cual el sonido no dejaba de ser aún bastante intenso. Describiendo C. Martins una tormenta de que fué testigo en tan elevadas regiones, dice que «los truenos no producian un fragor continuado, sino golpes secos como el estampido de un arma de fuego.» Gay-Lussac observó en su célebre ascension en globo, que el sonido de su voz se amortiguaba considerablemente á los 7,000 metros de altura á que habia llegado.

En suma, de todos los hechos que acabamos de enumerar, debe deducirse lo siguiente:

El sonido tiene su orígen en ciertos movimientos impresos á las masas ó á las moléculas de los cuerpos elásticos: la percusion, el roce, la pulsacion, la accion del calor y de la electricidad y las combinaciones bruscas que son causa de las explosiones químicas, son otros tantos modos de producirse el sonido;

Los cuerpos sonoros son los cuerpos elásticos: pueden ser sólidos, líquidos ó gaseosos;

Pero no basta que el movimiento que engendra el sonido se produzca en los cuerpos sonoros para que el oído perciba su sensacion, sino que tambien se requiere que entre el orígen del sonido y el órgano auditivo haya una serie no interrumpida de cuerpos, una sucesion de medios ponderables;

El aire es el vehículo más comun del sonido: pero los cuerpos sólidos, los líquidos y los varios gases son tambien aptos para trasmitir el movimiento particular que lo constituye;

Por último, en el vacío no se trasmite el sonido.

CAPÍTULO II

LA VELOCIDAD DEL SONIDO

I

LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE.—ANTIGUOS EXPERIMENTOS

El sonido no se trasmite instantáneamente desde el cuerpo sonoro al oído, como nadie ignora. Basta, en efecto, una corta distancia para advertir que media un intervalo apreciable entre el instante en que el ojo ve el movimiento que da orígen al sonido y aquel en que el oído percibe su primera impresion.

Así pues, el sonido se propaga sucesivamente al través de los medios ponderables.—¿Cuáles son las leyes de este movimiento? ¿Con qué velocidad se propaga el sonido? ¿Es constante esta velocidad ó varía con la distancia? ¿Es diferente segun el medio, mayor ó menor en los líquidos y en los sólidos que en el aire ó en los gases, en direcciones varias, horizontales, oblicuas, verticales, en las montañas mayor que en las llanuras? ¿La aumentan ó la disminuyen los movimientos de trasporte del aire, el viento?

Por estas preguntas podrá verse cuán compleja es la cuestion; pero los primeros físicos que de ella se ocuparon, empezaron naturalmente por considerarla bajo su aspecto más sencillo, habiéndose limitado á medir rudimentariamente la velocidad de propagacion del sonido en el aire, y prescindiendo de las demás circunstancias que acabamos de enumerar.

En general, toda medida de velocidad del sonido está basada en la diferencia que existe entre la velocidad de la luz y el sonido mismo; y á decir verdad, en todos los experimentos hechos hasta estos últimos años jamás se ha determinado otra cosa sino dicha diferencia. Hemos visto que Séneca habia ya consignado este hecho, y hoy todos sabemos que no se incurre en error alguno apreciable considerando la velocidad de la luz como infinita.

Hé aquí el procedimiento que se debe seguir: Se mide con toda la precision posible una distancia, á cuyos dos extremos se sitúan dos observadores. Uno de ellos produce un sonido

valiéndose de algun medio que sea visible en lontananza, por ejemplo, de la detonacion de un arma de fuego, cuyo fogonazo marca, en el momento de divisarlo el segundo observador, el instante preciso en que comienza la conmocion sonora. Provisto este segundo observador de un instrumento á propósito para valuar el tiempo, verbigracia de un reloj de segundos, anota el instante de la aparicion de la señal luminosa, y luégo aquel en que llega á su oído la primera impresion del sonido: el intervalo indicará en segundos y fracciones de segundo el tiempo trascurrido entre las dos fases del fenómeno. Claro está que dividiendo la distancia de una á otra estacion por el número que indica este intervalo, se tendrá el espacio cruzado por el sonido en un segundo, ó lo que es lo mismo, su velocidad. Esto supone ciertamente que la velocidad del sonido es constante, lo cual se puede comprobar aproximadamente variando la distancia de las estaciones extremas, ó instalando puntos de observacion intermedios.

Antes de describir los experimentos recientes más exactos, reseñemos sucintamente las pruebas que hicieron los antiguos para medir la velocidad del sonido.

Estas pruebas distan mucho de concordar entre sí, como veremos; lo cual no es de extrañar si se tiene en cuenta la poca precision de los primeros procedimientos adoptados.

Segun parece, los académicos de Florencia fueron los que efectuaron en 1660 el experimento más antiguo de que se tiene noticia, del cual resultó que el sonido tiene una velocidad de 1,148 piés, es decir, de $372^{m},90$. El P. Mersenne habia averiguado ya indirectamente esta velocidad, basándose en el fenómeno del eco ó de la reflexion del sonido, deduciendo que aquella era de 972 piés (ó unos 316 metros) por segundo. La primera de las indicadas cifras era muy alta y la segunda demasiado baja. Las demás mediciones distaban todavía más de la verdad (1). Conviene decir que semejantes resultados apénas pueden inspirar confianza por la razon siguiente:

Ante todo, y por lo general, se conocian imperfectamente las distancias de las estaciones extremas: primera causa de error. Otra, más grave aún, consistia en la escasa precision con que se medía el tiempo. El P. Mersenne, por ejemplo, reconoció que la voz podia pronunciar en un segundo siete sílabas distintas y que un eco, distante 81 toesas, las reflejaba en su totalidad en el segundo siguiente. Cada uno de los sonidos que componian las siete sílabas habia recorrido por lo tanto en un segundo el doble de la distancia del eco, ó sea 972 piés, lo cual es una imperfecta aproximacion y no una medida exacta.

Para comparar los resultados obtenidos, seria preciso además tener en cuenta el estado termométrico é higrométrico de la atmósfera, y tambien la fuerza, direccion y velocidad del viento. Más adelante veremos cómo influyen estas circunstancias tan variables en la mayor ó menor rapidez de la conmocion sonora. Pues bien, en los experimentos hechos por los antiguos, no se tenian ni remotamente en consideracion dichas influencias.

II

VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE: EXPERIMENTOS RECIENTES

Los primeros experimentos precisos datan del año 1738 y los hizo la Academia de ciencias de Francia. Una comision compuesta de tres sabios franceses, Lacaille, Cassini de Thury y Maraldi, escogió para estaciones de observacion los puntos siguientes: en Paris, el Observatorio y la pirámide de Montmartre; en los alrededores, el molino de Fontenay-aux-Roses, Dammartin y el castillo de Lay en Montlhéry. Por desgracia, no se midió el tiempo sino con medio segundo de diferencia; la mayor parte de los cañonazos no fueron recíprocos, ni se

(1) La *Enciclopedia* da como velocidad del sonido en el aire, las cifras siguientes, deducidas por varios físicos del siglo XVII; muchas de ellas no concuerdan con las que encontramos en otras publicaciones antiguas, lo cual no sabemos si consistirá tal vez en que los experimentos hechos por ciertos observadores fueron múltiples y dieron resultados divergentes. Hé aquí el párrafo en cuestion, que por cierto no indica las circunstancias en que se hicieron las mediciones: «La velocidad del sonido varía segun los diferentes autores que la determinan. Recorre el espacio de 968 piés en un segundo, segun Isaac Newton; 1,300 segun Robert; 1,200 segun Boyle; 1,300 segun el doctor Walker; 1,474 segun Marsenne; 1,142 segun Flamsteed y el doctor Halley; 1,148 segun la Academia de Florencia, y 1,172 segun los antiguos experimentos de la Academia de ciencias de Paris. Derham pretende que la causa de esta variedad dimana en parte de que no mediaba la suficiente distancia entre el cuerpo sonoro y el punto de observacion, y en parte de que no se tuvo en cuenta el viento.» No hacemos mencion de estos resultados sino para demostrar la incertidumbre que hace dos siglos reinaba entre los físicos acerca de este punto de la ciencia.

calculó la velocidad del viento; por último, la temperatura sólo se indicó de un modo vago. Véanse los resultados que dieron los experimentos del 14 y 16 de marzo. El 14, dia en que llovia con alguna fuerza, el sonido recorrió 11,756 toesas entre Montlhéry y el Observatorio, en 68 segundos, promedio de los dos intervalos de ida y vuelta: esto equivale á 172'9 toesas por segundo. El 16, el promedio de los dos cañonazos recíprocos entre las mismas estaciones fué de $68^s,25$, y por consiguiente la velocidad del sonido de $172^t,25$.

Entónces se reconoció la influencia del viento. Si sopla en la misma direccion en que se



Fig. 263.—Experimentos hechos por la Oficina de Longitudes sobre la velocidad del sonido

propaga el sonido, aumenta la velocidad de éste; si en sentido contrario, la aminora otro tanto, y esto es lo que explica la necesidad de los disparos recíprocos. Luégo veremos lo que dice Arago acerca de este punto. Por último, si el viento sopla en direccion oblicua, la velocidad del sonido aumenta ó disminuye segun el ángulo que su direccion forma con la del viento. La influencia de este no es nula sino en el caso de que sople en ángulo recto entre las dos estaciones extremas.

Los mismos experimentos dieron á conocer que la velocidad del sonido en el aire es independiente de la presion atmosférica, y que es uniforme, es decir, que el sonido recorre un espacio doble, triple, etc., en un intervalo doble, triple, etc. Las estaciones intermedias sirvieron para comprobarlo así.

Las pruebas hechas por los académicos franceses fueron el punto de partida de muchas mediciones efectuadas en 1739 por Lacaille y Cassini en Aguas-Muertas, en 1740 y 1744 por La Condamine en Quito y Cayena; en 1778 y 1791 por Kœstner y Muller en Gotinga, y finalmente, en Santiago de Chile por Espinosa y Bauzá.

En 1809 y 1811 Benzenberg hizo junto á Dusseldorf varias series de mediciones de la velocidad del sonido, entre dos estaciones distantes 9,072 metros. Como los disparos no fueron recíprocos, no se eliminó tampoco la influencia del viento, pero la atmósfera estaba tranquila y los observadores provistos de relojes de terceros. Los resultados fueron los siguientes: velocidad del sonido á 2° sobre cero, $335^m,2$ por segundo; á 28°, $350_m,78$.

Siguen á continuacion los experimentos hechos en Madrás por el astrónomo inglés Goldingham. Resultados: velocidad del sonido á 27°,56, igual á $347^m,57$. Es un promedio de 800 observaciones; se disparaban los cañonazos desde los dos fuertes de San Jorge y Santo Tomás, y se oian en una estacion distante del primero $4,246^m,5$ y del segundo $9,059^m,2$.

Llegamos ahora por órden de fechas á los experimentos que mandó hacer en 1822 la Oficina de Longitudes, á propuesta de Laplace. Componíase la comision de cuatro individuos de esta corporacion, Arago, de Prony, Bouvard y Mathieu, á los cuales se agregaron Gay-Lussac y Humboldt. Tambien fué Montlhéry una de las estaciones elegidas, como en 1738; mas para evitar el trayecto del sonido al través de la atmósfera de una gran ciudad, en lugar de Montmartre ó del Observatorio, se escogió como segunda estacion otro punto de las cercanías, Villejuif. Para evaluar el tiempo se llevaban cronómetros de detencion proporcionados por Bréguet, los cuales marcaban décimos y hasta uno de ellos sexagésimos de segundo. Arago, de Prony y Mathieu se instalaron en Villejuif; Gay-Lussac, Humboldt y Bouvard en Montlhéry.

En cada una de las estaciones se habian situado dos cañones de á 6 cargados con cartuchos de peso igual (1^k y $1^k,5$).

Las pruebas empezaron en 21 de junio de 1822 á las diez y media y continuaron el dia siguiente á las once de la noche, estando el cielo despejado y la atmósfera casi tranquila. Cada noche se dispararon, en una y otra estacion y á una señal dada, doce cañonazos alternados de 10 en 10 minutos, y cada grupo de observadores anotó el número de segundos que trascurrian entre la aparicion de la luz y la percepcion del sonido.

Desde Villejuif se oian perfectamente los cañonazos disparados en Montlhéry, miéntras que los disparos de aquella estacion apénas se percibian en esta. Sin embargo, dice Arago, «el poco viento que hacia, soplaba de Villejuif á Montlhéry, ó mejor dicho, del N.N.O. al S.S.E.» Combinando los disparos recíprocos oidos por una y otra parte, se reconoció que el sonido habia invertido por término medio 54 segundos 6 décimos en cruzar la distancia que mediaba entre ambas estaciones. La temperatura era de $15^\circ,9$ y el higrómetro marcaba 72°. Siendo la distancia total de $18,612^m,52$, la velocidad del sonido habia sido de $340^m,88$ por segundo. Arago calculaba en $1^m,317$ el error probable que podia proceder de la incertidumbre de la medida de las distancias y de la valuacion del tiempo.

Hemos visto que para compensar la influencia del viento se observan disparos recíprocos, pero esta reciprocidad no es siempre rigurosamente simultánea; entre los cañonazos combinados y disparados en Montlhéry y Villejuif, mediaban intervalos de cinco minutos. Pues bien, dice Arago, «si se tiene en cuenta que el viento es siempre intermitente, y que entre dos ráfagas fuertes hay con frecuencia momentos de calma completa, no parecerán excesivos los intervalos de cinco minutos que hemos debido combinar, en nuestro concepto, para los disparos correspondientes. Léjos de pretender amenguar estas objeciones, añadiré si se quiere, que en ciertos casos podrian hacerse los disparos al mismo tiempo en las dos estaciones, sin que la semi-suma de los dos tiempos de propagacion fuese independiente del viento. Supongamos, en efecto, que el 21 de junio, por ejemplo, hubiera empezado á soplar una ráfaga del norte en el instante de disparar un cañonazo en Villejuif; el sonido, más rápido que el viento, se habria propagado desde dicha estacion á la de Montlhéry como en una atmósfera tranquila, al paso que el ruido partido de Montlhéry en el mismo segundo habria encontrado el viento contrario ó del norte ántes de llegar á Villejuif, sufriendo por consiguiente mayor ó menor retraso en su marcha. ¿Y qué debemos deducir de aquí, sino que es absolutamente necesario que la atmósfera esté tranquila y serena para hacer semejantes experimentos?»

Por este último concepto, los experimentos de 1822 fueron tan satisfactorios como era posible, y quedó además probado que la velocidad de propagacion del sonido es independiente de la carga del cañon, y por consiguiente de la intensidad del sonido.

Los físicos holandeses Moll y Van Beek hicieron en 1823 en Amersfoort una serie de experimentos encaminados principalmente á estudiar la influencia del viento, cuya direccion y velocidad las indicaban buenos anemómetros. Dicha velocidad, reducida á 0° y al aire seco, resultó ser de $332^m,05$.

Otros dos sabios austriacos, Stampfer y Myrbach, obtuvieron en 1822 la cifra de $332^m,44$.

Antes de llegar á los experimentos contemporáneos, hagamos tambien mencion de los que efectuaron Bravais y Martins en 1844, de los

cuales resultó la cifra de 332m,37 á la temperatura del hielo fundente y al aire seco.

III

CONDICIONES QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

La velocidad del sonido en el aire se puede calcular teóricamente. Siendo el sonido, como más adelante veremos, un movimiento vibratorio que se propaga en los medios elásticos, se prueba que su velocidad depende á la vez de la elasticidad y de la densidad del medio flúido en que se mueve. Cuando la presion á que dicho gas está sometido, y por consiguiente su elasticidad continúan siendo las mismas, la velocidad del sonido está en razon inversa de la densidad del gas; si por el contrario, la presion varía sin que cambie la densidad, la elasticidad es la que varía, y la velocidad del sonido es tanto mayor cuanto más lo sea la elasticidad. Débese á Newton la primera demostracion teórica de estos principios, que acabamos de enunciar sin formularlos rigurosamente.

En el aire atmosférico, la presion y densidad varían precisamente en la misma relacion, siempre que la temperatura sea constante, y la velocidad del sonido no varíe sino con ella. La experiencia confirma esta prevision de la teoría.

Síguese de aquí que, para que sean comparables los resultados de los diferentes experimentos hechos por los físicos sobre la velocidad del sonido en la atmósfera, deben referirse todos á una misma temperatura. Tambien es preciso hacer una correccion relativa al estado higrométrico del aire. Por lo comun se refiere la velocidad observada á la que tendria el sonido en el aire seco y á la temperatura de 0° centígrados ó del hielo fundente. Recíprocamente, dada la velocidad del sonido en estas circunstancias, se puede averiguar la que tendria á mayor ó menor temperatura. La correccion que se ha de hacer es de 0m,626 por cada grado centesimal, debiéndose añadir esta cantidad si la temperatura sube, y deducirla si baja.

Discutiendo M. Roux las condiciones de los varios experimentos anteriormente mencionados, ha calculado el siguiente cuadro de la velocidad del sonido á 0°.

1738.	Academia de ciencias.	332m,60
1811.	Benzenberg. . . .	332 33
1821.	Goldingham. . . .	331 10
1822.	Oficina de Longitudes.	330 64
1822.	Stampfer y Myrbach.	332 44
1823.	Moll y Van Beek. .	332 25
1844.	Bravais y Martins. .	332 37

De estos siete experimentos, cinco dan á corta diferencia 332 metros como velocidad de la propagacion del sonido: de los otros dos resulta una cifra un poco menor. Pero no hay que olvidar que las distancias recorridas eran muy desiguales, las temperaturas observadas las de los puntos extremos, y la influencia del viento no siempre estaba corregida por los disparos recíprocos. Por consiguiente, no es de extrañar la diferencia de 1m,80 entre los resultados más divergentes, la cual se explica por las diferencias probables de las condiciones en que se hallaban las capas de aire intermedias atravesadas por el sonido, en el momento en que se hicieron los experimentos correspondientes.

En todos los que acabamos de mencionar, excepto en los hechos por Bravais y Martins, y por Stampfer y Myrbach, la direccion del sonido era poco ménos que horizontal, y por lo tanto, las velocidades del sonido observadas se refieren únicamente á esta direccion. Pero cuando el sonido se propaga esféricamente alrededor de un centro de conmocion, ¿conserva tanto á la ida como á la vuelta la misma velocidad, en una direccion oblicua al horizonte? Más claro; la propagacion de una conmocion sonora entre dos puntos de altitud diferente, ¿debe efectuarse en el mismo espacio de tiempo, tanto si va el sonido de arriba abajo como de abajo arriba? La teoría indica que no debe haber diferencia. De una estacion baja á otra elevada, la presion barométrica ó la elasticidad del aire disminuye; pero su densidad varía en la misma proporcion: la temperatura es lo único que cambia, y ya sabemos que la velocidad del sonido depende de ella, y que va disminuyendo á medida que las capas de aire son más frias. Por consiguiente un sonido que parta de la estacion baja marchará hácia la elevada recorriendo espacios cada vez más pequeños á cada segundo del trayecto. A la vuelta sucederá lo contrario: la propagacion sonora vuelve á pasar en sentido inverso por las mismas velocidades,

que entónces son crecientes; de suerte que la duracion del trayecto debe ser la misma en uno ú otro caso.

Con objeto de comprobar estas deducciones del raciocinio, hicieron Stampfer y Myrbach en 1822, en Salzburgo (Tirol), los experimentos cuyos resultados hemos indicado. La diferencia de nivel de las estaciones era de 1,364 metros; la velocidad del sonido ascendente resultó igual á la del descendente; pero como este resultado era debido á una sola observacion, los físicos franceses A. Bravais y Martins consideraron oportuno repetirlas en setiembre de 1844. Las estaciones elegidas estaban situadas, la una en la cumbre del Faulhorn, en los Alpes berneses, y la otra en la aldea de Tracht, cerca de Brienz y á orillas del lago de este nombre. La diferencia de altitud de ambas estaciones era de 2,100 metros, y la distancia oblicua recorrida por el sonido de 9,650. Hízose uso con tal objeto de dos cañoncitos de hierro; y los observadores estaban provistos de excelentes contadores y relojes de segundos. El sonido invirtió por término medio 28'55 segundos en recorrer la distancia oblicua de las estaciones: la temperatura media era $8^{\circ},2$; por lo tanto la velocidad era de $338^{m},01$; y suponiendo que la temperatura hubiese disminuido con regularidad de una estacion á otra, hé aquí cómo los observadores formularon el resultado que su experimento les dió:

«*Velocidad igual de los sonidos ascendentes y descendentes*, á razon de $332^{m},4$ en el aire seco á la temperatura del hielo fundente.»

La influencia de la temperatura en la velocidad del sonido es evidente, como lo comprueba el solo exámen de los resultados obtenidos por todos los experimentadores, que han observado á temperaturas comprendidas entre 1 ó 2° y 30° centígrados. Pero esta misma influencia, demostrada tambien por la teoría, ¿se manifiesta durante los grandes frios ó los grandes calores, es decir, á temperaturas extremas? Como ejemplo de velocidades del sonido medidas á temperaturas notablemente inferiores al hielo fundente, se cita la del teniente Kandalle, en la América del Norte, que dió por resultado $313^{m},9$ á -40°, y la del capitan Parry en las mismas regiones, cuyo resultado fué $309^{m},2$ á $-38^{\circ}5$. Reducidas estas velocidades á 0°, dan $339^{m},3$ y $333^{m},2$: la discordancia que entre ambas se nota puede consistir en la influencia del viento, pues los disparos no fueron recíprocos.

IV

EXPERIMENTOS CONTEMPORÁNEOS SOBRE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

Lleguemos ya á los experimentos más recientes.

Despues de discutir Le Roux los resultados que dejamos trascritos, habia llegado á convencerse de que las divergencias de los números que representaban la velocidad del sonido á 0° y al aire libre exento de humedad consistian principalmente en hacerse un cálculo demasiado bajo de la temperatura de las capas aéreas realmente recorridas por la onda sonora. De los trabajos meteorológicos contemporáneos efectuados por Becquerel, Babinet y Martins y de las observaciones hechas en globo por Glaisher resulta que la temperatura á altitudes diferentes varía con arreglo á una ley más complicada de lo que se creia, y que especialmente de noche llega, á cierta distancia, á uno ó muchos máximos. En virtud de esta suposicion, ocurriósele á dicho físico la idea, que puso en práctica, de hacer nuevos experimentos en que pudiera evitar todas estas causas de error.

El principio del método ideado por Le Roux es el siguiente: colócanse á corta distancia dos membranas elásticas, verbigracia de guttapercha muy delgada: una onda sonora que las encuentra á su paso y las agita, ocasiona la interrupcion de una corriente eléctrica que recorre un aparato de induccion cuya chispa imprimirá su huella en un cronoscopio arreglado con este objeto. No habiendo podido Le Roux encontrar una calma atmosférica bastante perfecta para hacer el experimento al aire libre, se limitó al siguiente caso particular:

«Determinar, sin el auxilio del oído, la velocidad de propagacion de una conmocion aislada en una masa gaseosa exenta de humedad, de temperatura exactamente conocida y contenida en un tubo cilíndrico cuya longitud sea recorrida en una fraccion de segundo.»

El tubo empleado por Le Roux era de zinc encorvado sobre sí mismo en dos porciones iguales reunidas por un codo circular. Habia

extraido la humedad del aire, y mantenido su temperatura á 0° con hielo fundente contenido en una bañera que rodeaba al tubo por todas partes.

Producia la conmocion sonora con un solo golpe dado con un mazo de madera en una membrana de cautchuc sumamente estirada en uno de los extremos del tubo. Despues de recorrer dicha conmocion toda la longitud de este, ponia en movimiento la segunda membrana sujeta al otro extremo. El orígen y el fin de la propagacion sonora resultaban inscritos automáticamente por la electricidad, segun hemos dicho (1).

De una serie de 77 experimentos hechos con la precision que caracteriza los trabajos de tan sabio físico, y discutidos rigurosamente, resulta que la velocidad del sonido á 0° y en el aire seco es de 330'66 metros. Le Roux supone que todas las causas de incertidumbre ó de error reunidas no pueden producir una diferencia de más de 20 centímetros en este resultado, número casi idéntico al que dieron en 1822 los experimentos de la Oficina de Longitudes.

Miéntras Le Roux se ocupaba en medir la velocidad del sonido en condiciones perfectamente definidas y evitando todas las causas capaces de influir en esta velocidad y de modificarla, Regnault procuraba, por el contrario, variar de todos los modos posibles sus experimentos, á fin de determinar estas mismas influencias. A tenor de la reseña del sabio académico, daremos una idea de los principales resultados que obtuvo, con lo cual el lector tendrá un análisis completo de los trabajos efectuados acerca de este punto particular de la ciencia del sonido.

Cuando Newton, Lagrange y Eulero buscaron una fórmula que expresara la velocidad de las ondas sonoras, supusieron que el medio flúido, vehículo del sonido, era un gas *perfecto*, dotado de una elasticidad no alterada por los cuerpos ambientes; que los cambios dimanados de las variaciones de presion seguian rigurosamente la ley de Mariotte, y finalmente que las ondas sonoras se propagaban sin que mediara trasporte alguno de las masas gaseosas. Háse visto que la cifra que representaba teóricamente la velocidad del sonido en estas hipótesis es notablemente inferior á la velocidad observada (casi $^1/_6$), y al pronto se creyó que la diferencia procedia de causas de error inherentes á los procedimientos de observacion. Laplace halló en otra parte el motivo de dicha diferencia, haciendo ver que las condensaciones sucesivas del aire producian un desprendimiento de calor en el trayecto de las ondas, que por consiguiente aumentaba la elasticidad, y que la velocidad teórica del sonido era en realidad mucho mayor de lo que dedujeron Newton y sus sucesores. De aquí siguióse una fórmula más completa, más verdadera, pero calculada siempre en la hipótesis de que hubiera un gas perfecto.

Ahora bien: real y positivamente no existen estas condiciones de elasticidad perfecta de los gases. Sábese (y M. Regnault lo ha demostrado hace tiempo) que todos los gases se separan más ó ménos de la ley de Mariotte; pues lo propio sucede respecto de las demás condiciones, conforme lo han probado los recientes experimentos del mismo sabio. Su fórmula difiere, pues, de la de Newton modificada por Laplace. Faltaba comprobar, mediante experimentos preparados de un modo conveniente, la influencia de cada una de estas infracciones de la antigua hipótesis teórica sobre la velocidad real de las ondas sonoras.

M. Regnault se ha ocupado ante todo del estudio de la propagacion del sonido en tubos cilíndricos rectilíneos.

Segun la fórmula de Laplace, la velocidad del sonido es independiente de la intensidad, pero la fórmula más completa dada por Regnault indica lo contrario; segun esta, la velocidad es tanto mayor cuanto más considerable la intensidad. Admitíase además que la intensidad debia ser indefinidamente la misma en un tubo cilíndrico rectilíneo; pero los expe-

(1) Indiquemos el medio de que se valia Le Roux para anotar el tiempo y medir la duracion de la propagacion. El cronoscopio ideado por él era sobremanera ingenioso. Consistia en una regla dispuesta verticalmente en reposo, y luégo abandonada libremente á la accion de la gravedad. Esta regla estaba recubierta en una parte á propósito de su superficie de una hoja de plata ó de metal plateado, préviamente sometida á la accion del vapor de iodo. Miéntras duraba la caida de la regla, descargaba el mazo un golpe en la membrana de partida, y en seguida tenia efecto la propagacion de la onda y su llegada á la otra membrana situada en el extremo opuesto del tubo. Las chispas de induccion que brotaban en los precisos momentos del orígen y fin de la conmocion, dejaban sus huellas en dos puntos de la superficie iodada. La distancia entre ambos puntos permitia calcular el intervalo trascurrido entre dichos momentos, en virtud de la ley de la caida de los cuerpos, quedando así medida la duracion del fenómeno.

rimentos de Regnault prueban que no hay nada de esto; que aquella va debilitándose de un modo continuo y tanto más cuanto menor es el diámetro del tubo, lo que atribuye aquél principalmente á la reaccion de sus paredes elásticas (1). En efecto, una pistola cargada con un gramo de pólvora produce una detonacion que no la percibe ya el oido cuando ha recorrido

1150 metros en un tubo de		108 milímetros de diámetro			
3810	—	—	300	—	—
9540	—	—	1100	—	—

Esto prueba á la vez que la intensidad no es constante, y que la extincion del sonido es mayor en los tubos de reducido diámetro. Tampoco la velocidad del sonido es la misma en ellos. Reducida á 0° y en el aire seco, varía:

De $330^m,99$ á $327^m,52$ en los trayectos recorridos de $566^m,7$ á $2833^m,7$, siendo la carga de pólvora de 3 decígramos;

De $329^m,95$ á $326^m,77$ en los trayectos de $1351^m,95$ á $4055^m,85$, siendo la carga de 4 decígramos.

Estas velocidades son relativas á la propagacion de la onda sonora en el tubo más pequeño, de 108^{mm} de diámetro.

Hé aquí ahora las velocidades igualmente variables en los otros dos tubos, segun la longitud de los trayectos recorridos:

Tubo de 300 milímetros.	de $332^m,37$ á $330^m,34$	en trayectos de	1905^m á 3810^m
	de $330^m,43$ á $328^m,96$	—	7620^m á 15240^m
Tubo de 1100 milímetros.	de $334^m,46$ á $331^m,24$	—	749^m á 5672^m
	de $330^m,87$ á $330^m,52$	—	8508^m á 19851^m

Cuanto más cerca del punto de partida se toman las velocidades, mayores son, pero las cifras anteriores demuestran tambien la influencia del diámetro de los tubos (2). Regnault cree que la accion de las paredes en la propagacion del sonido era ya muy escasa en los tubos de mayor diámetro, verbigracia, de $1^m,10$. Opina que en este caso se puede considerar dicha influencia como nula, y que entónces la velocidad es casi la del sonido al aire libre. Así pues, de sus numerosos experimentos deduce lo siguiente:

«Que la velocidad media de propagacion, en el aire seco y á 0°, de una onda producida por un pistoletazo y contada desde la boca del arma hasta el momento en que se debilita de tal modo que ni siquiera agita las membranas más sensibles, es de $330^m,6$.»

Como se ve, este número es casi idéntico al deducido por Le Roux, y por lo tanto se le puede tener por exacto, con tanto mayor motivo cuanto que de los muchos experimentos hechos en la meseta de Satory (1862 á 1866) por Regnault, con arreglo al método de los disparos de cañon recíprocos, resultan $330^m,7$ en un trayecto total de 2445 metros. Agreguemos que el ilustrado físico ha comprobado directamente la ley segun la cual la velocidad del sonido es independiente de la presion.

Los experimentos de Regnault han hecho ver que la velocidad del sonido, por lo ménos en las columnas gaseosas limitadas por cilindros de reducido diámetro, no es independiente de la intensidad de la onda sonora. Mas al parecer, ninguna otra cualidad del sonido como su altura ó tono, su mayor ó menor gravedad ó agudeza, tiene influjo alguno en esta velocidad. Es un experimento que cualquiera puede hacer, escuchando á lo léjos una tocata, un canto musical, y mejor áun un concierto de instrumentos ó de voces. En esta circunstancia, los sonidos están enlazados entre sí por relaciones rigurosamente constantes, en la melodía por el ritmo y el compás, en la armonía por su concomitancia.

Pues bien, la experiencia prueba que la audicion á mayor ó menor distancia no altera ni las melodías ni los acordes, lo cual sucederia forzosamente si los sonidos se propagaran con distinta velocidad, variable con la altura. Biot comprobó este hecho en una distancia de más de un kilómetro, al practicar sus experimentos

(1) Acerca de este punto dice Regnault que en el trayecto de la onda sonora por el interior de la alcantarilla de San Miguel se oía *por la parte de fuera* un sonido muy fuerte en el momento de pasar la onda, cualquiera que fuese el punto de la línea en que se situase el observador. «Así pues, añade, se consume exteriormente una porcion notable de la fuerza viva.»

(2) «Es probable, añade, que la naturaleza de la pared y su pulimento más ó ménos perfecto influyan en este fenómeno. En prueba de ello citaré un caso; en las cloacas de gran seccion de Paris, se suele avisar á los obreros tocando una trompeta, y se ha reconocido que estas señales resuenan muchísimo más léjos en las galerías cuyas paredes están cubiertas de un cemento bien liso que en las que lo están de simple argamasa.»

sobre la velocidad del sonido en el hierro fundido, segun hemos indicado ya.

«Para saber, dice, si los sonidos graves ó agudos, fuertes ó flojos, se propagaban con la misma velocidad, ó si por este concepto habia alguna diferencia entre ellos, hice que se tocara la flauta junto á uno de los extremos del tubo. Sábese que por lo comun todo canto musical está sujeto á cierto compás que regula exactamente el intervalo de los sonidos sucesivos. Por consiguiente, si algunos de estos se hubieran propagado más de prisa ó más despacio que los otros, al llegar á mi oido se habrian confundido con los que les precedian ó seguian en el órden

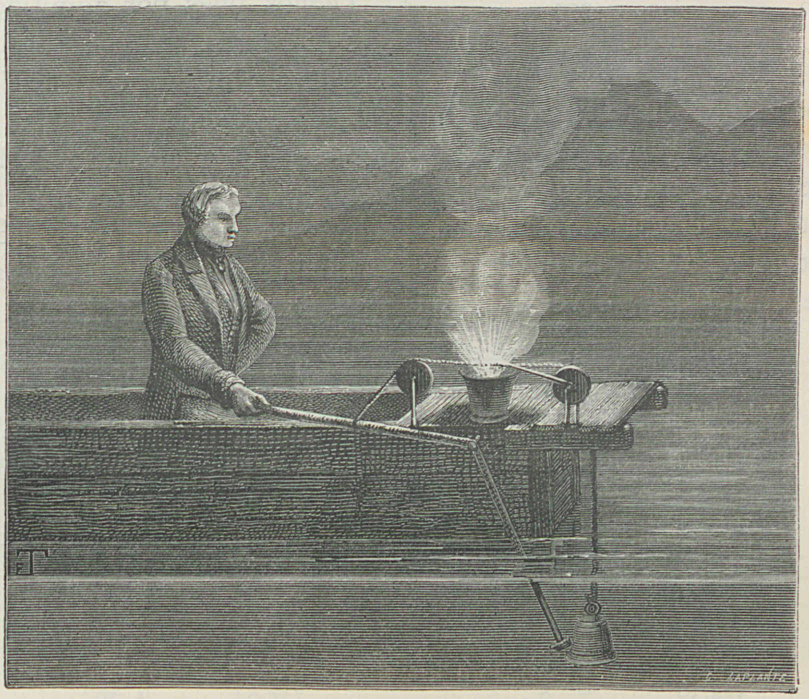


Fig. 264.—Medida de la velocidad del sonido en el agua. Estacion de partida

del canto, y la tocata oida de este modo habria parecido enteramente alterada. Pero en lugar de suceder así, era perfectamente regular y conforme con su compás natural; de donde resulta que todos los sonidos se propagan con igual velocidad. Los individuos de la Academia de Ciencias habian hecho ya esta observacion en 1738; pero ignoro de qué medios se valieron.»

Regnault ha comprobado tambien un fenómeno que no tuvieron en cuenta los físicos que midieron ántes que él la velocidad del sonido en el aire. Nos referimos á cierto movimiento de trasporte de las capas aéreas, que aumenta la rapidez de propagacion. «A consecuencia de este trasporte, dice, y de su gran intensidad, la onda debe andar más de prisa en las primeras partes del trayecto que en las siguientes, sobre todo siguiendo la línea de tiro. Pero esta aceleracion se aminora muy pronto y llega á ser casi imperceptible cuando la onda recorre grandes distancias.»

Biot ha observado este movimiento de trasporte, pero no al aire libre, cuando hizo los experimentos más arriba mencionados. «Algunos pistoletazos disparados junto á uno de los extremos de la columna cilíndrica en la cual hacia yo mis experimentos producian en el otro un estampido considerable, cuando llegaba á él la conmocion sonora. El aire era expulsado del último tubo con suficiente fuerza para producir en la mano un viento impetuoso, para despedir á más de medio metro de distancia los cuerpos ligeros que se habian situado en su direccion, y para apagar bujías encendidas, aunque se estuviera á 951 metros de distancia del punto donde se habia hecho el disparo dos segundos y medio ántes.»

La velocidad del sonido en gases distintos del aire se calcula teóricamente, en virtud de una ley muy sencilla, que no podemos mencionar aquí. Se la mide tambien prácticamente por el método llamado de las vibraciones, empleando al efecto tubos sonoros. Hé aquí algunos re-

sultados obtenidos de este modo por M. Wertheim:

Gases	Velocidad del sonido á 0^0
Aire.	333 metros
Acido carbónico.	262 —
Oxígeno.	317 —
Hidrógeno.	1270 —
Oxido de carbono.	337 —
Amoniaco.	407 —

Regnault ha podido medir directamente la velocidad del sonido en algunos gases, de los que llenaba dos conductos, uno de $567^{m},4$ y otro de $70^{m},5$ de longitud. De este modo ha deducido 1257 metros como velocidad en el hidrógeno, velocidad que equivale á 3,8 veces la del sonido en el aire, 279 metros en el ácido carbónico y 406 en el amoniaco.

V

MEDIDA DE LAS DISTANCIAS POR LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

Demos pues por admitido que el número $330^{m},6$ representa la velocidad del sonido en el aire libre y seco, á 0°, y deduzcamos de él los valores aproximados de esta velocidad á temperaturas diferentes sobre y bajo cero. Ya se ha visto que para pasar de un grado á otro, sobre ó bajo, basta añadir ó de ducir de la velocidad el número sensiblemente constante $0^{m},626$. Hé aquí el cuadro que resulta:

VELOCIDAD DEL SONIDO AL AIRE LIBRE

Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros	Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros	Temperaturas en grados centígrados	Velocidad por segundos en metros
− 20°.	318,10	+ 2°.	331,86	+ 20°.	343,20
− 15	321,25	+ 3	332,49	+ 21	343,83
− 14	321,88	+ 4	333,12	+ 22	344,46
− 13	322,41	+ 5	333,75	+ 23	345,09
− 12	323,04	+ 6	334,38	+ 24	345,72
− 11	323,67	+ 7	335,01	+ 25	346,35
− 10	324,30	+ 8	335,64	+ 26	346,98
− 9	324,93	+ 9	336,27	+ 27	347,61
− 8	325,56	+ 10	336,90	+ 28	348,24
− 7	326,19	+ 11	337,53	+ 29	348,87
− 6	326,82	+ 12	338,16	+ 30	349,50
− 5	327,45	+ 13	338,79	+ 31	350,13
− 4	327,08	+ 14	339,42	+ 32	350,76
− 3	328,71	+ 15	340,05	+ 33	351,39
− 2	329,34	+ 16	340,68	+ 34	352,02
− 1	329,97	+ 17	341,31	+ 35	352,65
0	330,60	+ 18	341,94	+ 40	355,80
+ 1	331,23	+ 19	342,57	+ 50	362,10

El conocimiento de estos números puede servir para medir rápidamente, con cierta aproximacion, la distancia entre dos puntos, cuando ningun obstáculo estorba la vista en el espacio que los separa.

Vése por ejemplo en el campo y en lontananza un cazador que dispara su escopeta. Si, teniendo un reloj de segundos, se cuenta el tiempo trascurrido desde que se divisa el fogonazo hasta que se oye la detonacion, bastará una simple multiplicacion para conocer la distancia que media entre el observador y el cazador. Pero tambien es preciso ir provisto de un termómetro para conocer la temperatura. En rigor seria menester que el cazador lo tuviese asimismo, y áun seria preferible que pudiera además observar y oir un disparo hecho por el observador. A falta de todos estos recursos de los que se puede carecer en parte, se procede por cálculo aproximado. Los marinos, los viajeros y los militares en campaña pueden sacar un partido muy útil de esta manera tan expedita de medir las distancias.

M. Radau da en su obra *La acústica* los detalles siguientes sobre el uso que M. Abbadie ha hecho de este método durante su larga permanencia en Etiopía:

«En la isla de Mocawa se dispara todos los

dias, á la puesta del sol y miéntras dura el Ramadan ó mes de abstinencia de los musulmanes, un cañonazo que anuncia la terminacion del ayuno. M. Abbadie se aprovechó de él para calcular el tiempo que trascurria entre el fogonazo y la llegada del sonido á la orilla opuesta. Situóse al efecto en una colina inmediata al pueblo de Omkullu, y allí aguardó el cañonazo del fuerte Mudir. Oyó el estampido á los 18 segundos de haber visto el fogonazo, y por lo tanto la distancia era de 6440 metros (1).»

En otra ocasion midió M. Abbadie, valiéndose del mismo método, la distancia que hay desde la ciudad de Adua hasta el monte Saloda. Hé aquí los detalles que Arnaldo de Abbadie da, con fecha 15 de agosto de 1840, acerca de esta aplicacion particular de la física á la geodesia:

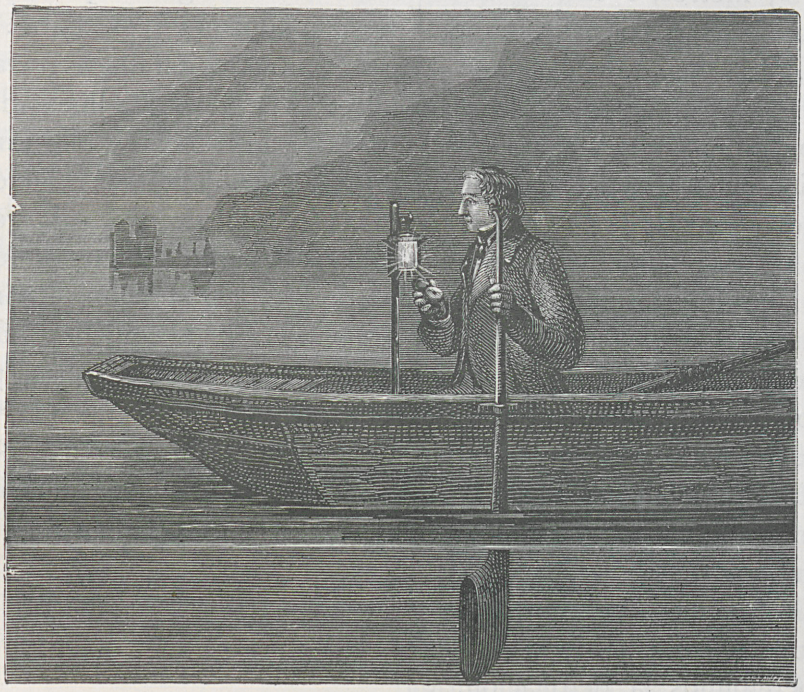


Fig. 265.—Medida de la velocidad del sonido en el agua. Estacion de llegada

«Hoy hemos hecho algunos experimentos para medir, valiéndonos de la velocidad del sonido, la distancia que hay entre la cumbre del monte Saloda, inmediato á esta ciudad (Adua) y el tejado de la casa de Ayta Tasfa, en la parroquia de Maihane Alam, donde está alojado actualmente el prefecto de la mision católica de Etiopía. Mi hermano, situado en la cima del monte y junto á una cresta de roca saliente, hacia disparos con un fusil de mecha: yo por mi parte disparaba con una escopeta. Unas túnicas blancas colgadas nos servian de señales. Yo llevaba el cronómetro de puntura, mi hermano el cronómetro G, cuyos golpes contaba. Nuestros disparos se oían muy bien; los de mi hermano con alguna debilidad, aunque distintos. Es de notar que miéntras el viento soplaba oblícuamente hácia la montaña, mi hermano percibia el sonido con más lentitud que yo. Inmediatamente despues de los seis disparos, observamos los termómetros seco y húmedo.» El resultado fué que la distancia que se trataba de averiguar, equivalia á 3 kilómetros.

Nos permitimos recomendar un medio tan rápido y cómodo de medir distancias á los oficiales del ejército. Aun sin termómetro ni reloj de segundos se puede conseguir con bastante aproximacion. No cabe duda de que el fogonazo que sale de la boca de un arma de fuego se ve mal de dia cuando el cielo está despejado, pero por poco nublado que esté ó al hacerse ya de noche, el resplandor de aquel es visible, y además, á falta de fogonazo se puede observar el humo. Presentemos un ejemplo: Una batería enemiga dispara un cañonazo, mediando entre el fogonazo y el estampido 15 segundos poco más ó ménos: el oficial que observa calcula que

(1) Esto supone una temperatura de 43° centígrados, en cuyo caso la velocidad del sonido es de $357^{m},7$ por segundo. Falta saber si la influencia del viento exigia además que se corrigiese este cálculo.

la temperatura está á 12°. La distancia resultará ser de 338 × 15, ó sean 5070 metros. Supongamos que la temperatura marcada en este momento por un termómetro fuese en realidad de 10°, y que un reloj de segundos marcara $14^s,5$; la distancia efectiva seria de 336 metros × 14,5, es decir 4885 metros. El error cometido llegaria á 185 metros, ó casi $^1/_{26}$ de la distancia verdadera, inexactitud pasadera en tales circunstancias.

Por lo demás se ve que el error más considerable en que se puede incurrir es el que procede de la apreciacion de la temperatura; pero un reloj de segundos y un termómetro de bolsillo no son objetos tan raros que su falta impida el hacer uso del método precedente con ciertos visos de exactitud.

Del propio modo se puede medir la distancia á que se halla de nosotros una nube de tormenta, de la cual vemos brotar relámpagos seguidos de truenos. Sábese que el instante en que se ve el surco luminoso, en que estalla la gigantesca chispa, es tambien el del estampido del trueno. Pues bien, contando el número de segundos que trascurren entre el relámpago y el instante en que percibimos la detonacion, y multiplicando este número por la velocidad del sonido (340 á 350 metros para las temperaturas comprendidas entre 15° y 30°), se tendrá la distancia que separa á la nube de la tierra. Cuando cae un rayo á corta distancia del espectador, el fragor del trueno sigue casi instantáneamente al relámpago; aquel á quien el rayo hiriese no tendria tiempo de distinguir el uno del otro, de lo cual resulta que el *relámpago visto* no es peligroso, y las personas asustadizas pueden tranquilizarse al ver la chispa, y aguardar sin zozobra el estampido del trueno. Verdad es que esto no basta para animarlas contra los rayos futuros.

Por término medio hay que contar de 2 á 3 segundos por cada kilómetro de distancia; 28 ó 29 segundos corresponderán pues á un miriámetro ó sean dos leguas y media.

De la diferencia que existe entre las velocidades de la luz, del sonido y de los proyectiles resultan consecuencias singulares. Por ejemplo, el soldado herido por una bala de cañon puede ver el fogonazo de la pieza, pero no oir la detonacion, pues la velocidad del sonido es menor que la de la bala; y si esta procede de larga distancia, como la resistencia del aire disminuye cada vez más la velocidad del proyectil, puede suceder que vea la luz y oiga la detonacion ántes de ser herido.

«Si un piquete de soldados formados en círculo, dice Tyndall, disparan sus fusiles á la vez, todas las descargas le parecerán una sola á la persona situada en el centro. Pero si aquellos están formados en línea recta, un observador colocado en la misma línea, más allá de uno de los extremos de la fila, oirá, en lugar de un solo sonido, un redoble más ó ménos prolongado. Del propio modo, la descarga del rayo en los diferentes puntos de una nube de gran longitud puede producir el fragor prolongado del trueno. Una larga fila de soldados que marcha con la banda de música á la cabeza por una gran carretera, no puede llevar el paso por igual, porque las notas musicales no llegan simultáneamente al oido de los soldados situados á vanguardia y á retaguardia.» *(El Sonido.)*

VI

VELOCIDAD DEL SONIDO EN LOS LÍQUIDOS

Hemos visto que el sonido se propaga en el agua y por lo general, en los líquidos lo propio que en el aire; pero la rapidez de propagacion es en ellos mucho mayor. Laplace ha averiguado teóricamente el valor de esta rapidez, valor que depende de la densidad del líquido así como de su compresibilidad. En su concepto, la velocidad del sonido en el agua de lluvia debe de ser 4 ½ veces, y en la de mar 4 $^7/_{10}$ igual á la del sonido en el aire.

Beudant hizo en Marsella los primeros experimentos relativos á este asunto, valiéndose de un procedimiento por el estilo del que sirvió para medir la velocidad del sonido en el aire. Dos embarcaciones del puerto, cuya distancia entre sí se habia medido de antemano, sirvieron de estaciones extremas, y una campana sumergida junto á una de aquellas, á la que se daba de vez en cuando un golpe á una señal convenida, producia el sonido que un buzo escuchaba en la otra estacion. Beudant dedujo 1500 como velocidad de propagacion en un segundo. Este número difiere mucho del que resultaria de la fórmula teórica de Laplace.

Lleguemos ahora á los experimentos que los físicos franceses Colladon y Sturm hicieron en 1827 en el lago de Ginebra.

Véase cómo los efectuaron:

Los observadores se habian apostado en dos barcas, una amarrada en Thonon y otra en la opuesta orilla del lago. Producia el sonido un martillazo descargado en una campana que pesaba 65 kilógramos y sumergida en el agua; en la otra estacion, una trompeta acústica de ancho pabellon recibia tambien en el agua y en una placa metálica puesta en su abertura el sonido propagado por la masa líquida. El observador que aplicaba el oido á la abertura de la trompeta, iba provisto de un cronómetro ó contador que marcaba con precision los segundos y fracciones de segundo.

Conocia el momento preciso de la percusion de la campana por la luz que producia la inflamacion de un montoncito de pólvora al que prendia fuego una mecha atada al martillo á modo de palanca.

Las figs. 286 y 287 de las págs. 267 y 269, harán comprender el mecanismo de este aparato, dispensándonos de describirlo más detalladamente.

El sonido recorrió en $9^s,4$ la distancia entre ambas estaciones, que era de 13,487 metros, lo cual da 1435 metros como velocidad de aquel en el agua á $8^\circ,1$ centígrados de temperatura: ya hemos visto que á esta temperatura la velocidad del sonido en el aire libre es de $335^m,64$. La experiencia demuestra tambien que el sonido se mueve 4¼ veces más de prisa en el agua dulce que en el aire.

El último dia de los experimentos, el agua del lago estaba agitada; pero esta agitacion no influyó de un modo apreciable en la rapidez de trasmision del sonido.

Tanto en uno como en otro experimento, las ondas sonoras se propagaron en una masa líquida ilimitada.

Wertheim ha demostrado que el sonido debe moverse más despacio en una columna ó en una red cilíndrica, siendo la primera velocidad igual á la segunda multiplicada por 1,225. Otros delicadísimos experimentos hechos por un método que no podemos describir aquí, le han dado los resultados que estampamos á continuacion.

VELOCIDAD DEL SONIDO

	Temperatura	En un chorro líquido	En una masa ilimitada
Agua del Sena. . .	15°	1173^m	1437^m
— . . .	30	1251	1527
— . . .	60	1408	1725
Agua de mar. . . .	20	1187	1454
Alcohol comun á 36.°	20	1050	1286
Eter sulfúrico. . . .	0	946	1159

En un mismo líquido, lo propio que en el aire, la velocidad del sonido aumenta con la temperatura.

VII

VELOCIDAD DEL SONIDO EN LOS SÓLIDOS

Esta velocidad, mayor ya en los líquidos que en el aire y en los demás gases, lo es todavía más en los medios sólidos. Segun creemos, Hassenfratz fué el que hizo las primeras tentativas para determinar esta última, segun lo que expone Haüy en su *Tratado de física*.

«Habiendo bajado Hassenfratz á una de las canteras de Paris, encargó á otra persona que diera un martillazo en una masa de piedra que forma la pared de una de las varias galerías practicadas en medio de las canteras. Miéntras tanto, él se iba alejando poco á poco del sitio donde se habia descargado el martillazo, aplicando el oído á la masa de piedra, y en breve percibió dos sonidos, uno de ellos trasmitido por la piedra y el otro por el aire. Oíase el primero mucho más pronto que el otro; pero tambien se debilitaba con mayor prontitud á medida que el observador se alejaba, de suerte que éste dejó de percibirlo á los ciento treinta y cuatro pasos de distancia, miéntras que aquel al cual servia el aire de vehículo no se extinguió hasta los cuatrocientos.

»Otros cuerpos de distinta naturaleza, como vallas de madera y barras de hierro puestas punta con punta en una longitud más ó ménos considerable han dado análogos resultados, con la diferencia de que el sonido propagado por la madera recorria un intervalo mucho mayor que el trasmitido por el aire ántes de llegar al término en que el oido dejaba de percibirlo, lo cual era precisamente lo contrario del efecto producido por el aire y la piedra. El mismo físico ha notado además que la trasmision del

sonido á través de los cuerpos sólidos no tan sólo es más rápida por lo general que la que tiene el aire por intermediario, sino que se efectúa en un espacio de tiempo inapreciable, por lo ménos en lo que respecta á las distancias á que circunscribió sus experimentos, la mayor de las cuales era de ciento diez pasos.»

Biot hizo estudios parecidos, pero en una longitud mayor y con medios más precisos. Aprovechóse al efecto de la larga columna formada por la cañería que lleva las aguas del Sena desde Marly hasta el acueducto de Luciennes, y 376 de los cuales ocupaban una extension total de $951^{m},2$. Véase cómo ha descrito el mismo Biot su experimento:

«Adaptábase á uno de los orificios de esta cañería una argolla de hierro del mismo diámetro que ella, con un timbre en su centro y un martillo que se podia dejar caer sobre él cuando se quisiera. Al dar el martillo en el timbre daba tambien en el tubo con el cual estaba en comunicacion mediante el contacto de la argolla, y por consiguiente, situándose un observador al otro extremo de la cañería debia percibir dos sonidos, uno trasmitido por el metal del tubo y el otro por el aire, y en efecto, se los oia distintamente aplicando el oído á los tubos, y hasta sin necesidad de aplicarlo. El primer sonido, más rápido, lo trasmitia el cuerpo de los tubos, y el segundo el aire. Varios martillazos descargados sobre el último tubo producian tambien esta doble trasmision. Observábase rigurosamente con cronómetros de medios segundos el intervalo que trascurria entre dos sonidos trasmitidos. De estos experimentos ha resultado que el metal trasmite el sonido 10¼ veces más de prisa que el aire.»

En efecto, hubo un intervalo de $2^{s},53$ entre los dos sonidos trasmitidos, siendo la velocidad del sonido en el aire de 340^{m}, 03. Mas debe advertirse que, componiéndose la cañería de muchos centenares de tubos unidos por discos de materias diferentes, aquella cifra no podia representar exactamente la velocidad del sonido en el metal.

La velocidad del sonido en los sólidos es fácil de calcular indirectamente por consideraciones teóricas, como la velocidad en los líquidos, ya averiguando el coeficiente de elasticidad del cuerpo, ó ya por el método llamado de las *vibraciones*. Valiéndose Laplace del primero, dedujo que la velocidad del sonido en el laton era 10½ veces igual á la del mismo en el aire. Chladni calculó por el segundo método dicha velocidad en varios metales, en el vidrio y en un gran número de especies de madera. Wertheim determinó luégo este valor en muchos cuerpos sólidos. Más adelante presentamos un cuadro de algunos de los resultados obtenidos.

Pero tambien se han hecho otras mediciones directamente. Wertheim y Breguet midieron en 1851 la velocidad del sonido en los alambres de hierro telegráficos del ferro-carril de Versalles: el sonido recorrió en $1^{s},2$ la longitud de $4{,}067^{m},2$, lo cual corresponde á una velocidad de 3,485 metros por segundo, unas diez veces más que en el aire; mas por el método de Chladni resultaba dicha velocidad 16 veces mayor, y el de las vibraciones hubiera dado 4,634 metros, es decir, 14 veces: ignórase la causa de estas anomalías.

Terminaremos este capítulo con algunas cifras tomadas de Chladni y de Wertheim y que representan la velocidad del sonido en cierto número de cuerpos sólidos, tomando por unidad la misma en el aire (1); las tres últimas columnas la representan á diferente temperatura. Esta ejerce tambien su influencia en la velocidad del sonido en los metales; mas, al contrario de lo que sucede con los líquidos y los gases, el aumento de calor disminuye la velocidad, excepcion hecha del hierro entre 20° y 100°. Y es que el calor disminuye por lo regular la elasticidad de los metales, al paso que aumenta la de los líquidos y gases. La excepcion del hierro consiste probablemente en su estructura molecular especial, y así parece probarlo el que los hierros de varias procedencias, los alambres de hierro ó de acero, el acero fundido no ofrecen el mismo carácter bajo este punto de vista.

La elasticidad de las maderas varía segun la direccion de las fibras leñosas ó de las capas; es mucho mayor en la direccion de las fibras que en la perpendicular, y en este último sentido lo es aún más en direccion trasversal á las capas que en la de las capas mismas. Lo pro-

(1) Las cifras de las dos primeras columnas son las velocidades expresadas en funcion de la del sonido en el aire; las otras columnas representan estas velocidades en metros.

pio acontece respecto de la velocidad del sonido, conforme lo demuestra el siguiente cuadro, y segun resulta de los delicados experimentos hechos por Wertheim.

VELOCIDAD DEL SONIDO EN VARIOS CUERPOS SÓLIDOS

	Segun Chladni	Segun Wertheim	á 20° metros	á 100° metros	á 200° metros
Plomo	»	4,0	1230	1200	»
Oro	»	6,4	1740	1720	1735
Estaño	7,5	7,5	2550	»	»
Plata	9,0	8,0	2710	2640	2480
Platino	»	8,5	2690	2570	2460
Cobre	»	11,2	3560	3290	2950
Zinc	»	11,0	3740	»	»
Hierro	16,6	15,4	5130	5300	4720
Acero fundido	16,6	15,0	4990	4925	4790
Alambre de hierro	»	15,5	4920	5100	»
Alambre de acero	»	15,0	4880	5000	»

VELOCIDAD DEL SONIDO EN VARIAS MADERAS

	En direccion de las fibras	Trasversal á las capas	En direccion de las capas
Abeto	4640m	1335m	784m
Haya	3340	1840	1415
Roble	3850	1535	1290
Alamo	4280	1400	1050

VELOCIDAD DEL SONIDO EN ALGUNOS OTROS SÓLIDOS

Cristal de lunas. 19 veces la velocidad en el aire ó 5440m
Cristal de tubos. 12 — — ó 4080

Vése en resúmen que de todas las sustancias que pueden servir de vehículos al sonido, aquellas en que se propaga con mayor rapidez son: el hidrógeno entre los gases, el agua de mar entre los líquidos, el hierro entre los metales y el vidrio y la madera de abeto entre los sólidos. Este último es el que predominaria si se adoptase la cifra de Chladni, el cual considera la velocidad del sonido en la madera de abeto equivalente á 18 veces la que tiene en el aire. Segun los cuadros anteriores, el hierro es el que ocupa el primer lugar entre los sólidos por este concepto.

CAPÍTULO III

REFLEXION Y REFRACCION SONORAS

I

ECOS Y RESONANCIAS

Sabemos que la luz y el calor se propagan á la vez, directamente por radiacion, é indirectamente por reflexion. Además, cuando la reflexion se efectúa en medios de diferente constitucion molecular y densidad, la direccion de las ondas luminosas y caloríficas sufre una desviacion particular, conocida por los físicos con el nombre de *refraccion.*

En el sonido, lo mismo que en el calor y la luz, se presentan tambien los fenómenos de reflexion y refraccion, obedeciendo casi á las mismas leyes.

Cualquiera puede cerciorarse mediante observaciones familiares de que el sonido se refleja cuando, al propagarse por el aire ó por cualquier otro medio, tropieza con un obstáculo. Y en efecto, los ecos y las resonancias son fenómenos ocasionados por la reflexion del sonido. Cuando estamos en una habitacion de dimensiones algo grandes, y en cuyas paredes no hay objetos que apaguen el sonido, la voz resulta reforzada, y el ruido de los pasos ó el del choque de los cuerpos sonoros resuena con mayor intensidad. En un salon espacioso, las palabras parecen duplicarse, lo cual suele hacerlas confusas y difíciles de oir distintamente. Este refuerzo de los sonidos, originado por la reflexion del sonido en un plano ó en una superficie cualquiera, es lo que se llama *resonancia.*

Si la distancia del observador á la pared reflectora excede de 20 metros, percibe de nuevo

con claridad cada una de las sílabas que pronuncia: este fenómeno es el del *eco sencillo;* pero cuando cada sílaba resulta repetida dos ó muchas veces, el eco es *múltiple.*

Veamos cuáles son las razones físicas de estos fenómenos.

Por breve que sea la duracion de un sonido, persiste algun tiempo la sensacion que produce en el oído del observador, $^{1}/_{10}$ de segundo poco más ó ménos. Durante este tiempo, el sonido recorre unos 34 metros, de suerte que si la distancia AO del observador á la pared que refleja el sonido (fig. 266) no llega á 17 metros, la

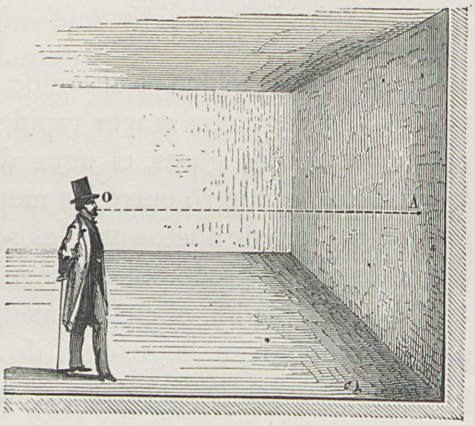


Fig. 266. — Reflexion del sonido: eco ó resonancia

sílaba que ha pronunciado tiene tiempo de ir y volver á su oído ántes que cese enteramente la sensacion experimentada. El sonido reflejado se mezclará, pues, con el que el observador percibe directamente, y como emanará á la vez de una multitud de reflexiones parciales de puntos situados á diferentes distancias, resultará de aquí un zumbido confuso, ó sea lo que acabamos de llamar resonancia. La misma explicacion es aplicable al caso en que dos personas que estén en la misma sala hablen una con otra ó bien cada cual de por sí: la confusion que de ello resulte será tanto mayor cuanto con más rapidez hable uno ú otro interlocutor.

Ahora, si la distancia OA es 17 metros mayor, cuando el sonido de la sílaba pronunciada vuelva al oído por reflexion, la sensacion habrá terminado ya, y se oye una repeticion más ó ménos débil del sonido directo. Este es el eco. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será tambien el número de sílabas ó de sonidos distintos repetidos de este modo. Supongamos por ejemplo que esta distancia sea de 180 metros, y que el observador pronuncia cuatro sílabas en un segundo, la palabra: *contestadme.* El sonido invierte poco más de un segundo en ir á la superficie reflectora y volver: la sensacion directa ha pasado, y el oído percibe segunda vez distintamente: *contestadme.* Esto por lo que se refiere al eco *simple,* que en este caso es *polisilábico.*

Resulta el *eco múltiple* cuando se emite el sonido entre dos superficies paralelas reflectoras y bastante apartadas entre sí: entónces el sonido reflejado en una de ellas, se refleja de nuevo en la otra, luégo otra vez y otra, y así sucesivamente, aunque, como se comprenderá, perdiendo intensidad á cada nueva reflexion. Los edificios, las rocas, las arboledas y hasta las nubes producen el fenómeno del eco.

II

ECOS NOTABLES

Entre los ecos más notables, cítase el eco múltiple de la quinta de Simonetta en Italia, que repite hasta cuarenta veces las palabras pronunciadas entre las dos alas paralelas del edificio. En el parque de Woodstock, en Inglaterra, habia un eco que, segun dice el doctor Plott, repetia distintamente diez y siete sílabas de dia y veinte de noche. La misma particularidad, pero más marcada todavía, se observa en el eco de Ormesson, poblacion del valle de Montmorency, cuyo eco, segun asegura Mersenne, repetia de noche catorce sílabas, y de dia tan sólo siete. No es presumible que estos casos particulares reconozcan por causa el influjo de la calma de la noche en la intensidad del sonido, puesto que se trata de ecos simples, y aunque polisilábicos, no múltiples. ¿Consistirá la verdadera causa en que la temperatura más baja de la noche disminuye la velocidad del sonido, lo cual equivale á un aumento en la distancia de la superficie reflectora? ¿No podria causar tambien la degeneracion del eco, la falta de homogeneidad de las masas de aire durante el dia? Humboldt atribuia á esta causa la diferencia de intensidad que habia notado en el ruido producido por la gran catarata del Orinoco, segun que se le oia de dia ó de noche.

«En los cinco dias que pasamos cerca de la catarata, dice, observamos con sorpresa que

el estruendo del agua era tres veces mayor de noche que de dia. En Europa se nota la misma singularidad en todas las cascadas. ¿Qué causa podrá haber para ello en un desierto en que no hay nada que interrumpa el silencio de la naturaleza? Probablemente habrá que atribuirla á la corriente de aire cálido ascendente que de dia contiene la propagacion del sonido, y que cesa de noche cuando se enfria la superficie de la Tierra.»

Entre la catarata y el sitio donde estaba Humboldt habia un llano salpicado de peladas rocas con alguna verdura entre ellas. Por efecto de la reverberacion solar, resultaba que las rocas eran de dia bases de columnas de aire caliente, separadas por otras de temperatura más baja, y por lo tanto más densas. Al atravesar el sonido esta atmósfera de densidad variable, experimentaba reflexiones sucesivas que no podian ménos de amenguar su intensidad. Restablecíase la homogeneidad de noche, y el sonido llegaba al oido sin haber pasado por reflexion alguna, y por consiguiente sin debilitarse.

«Hay un eco notable junto á Rosneath, hermosa casa de campo de Escocia, al oeste de un lago salado que comunica con el rio Clyde, diez y siete millas más abajo de Glasgow; dicho lago está rodeado de colinas, algunas de las cuales son rocas áridas; las otras están cubiertas de arbolado. Un hábil corneta, situado en una punta de tierra que el agua deja á descubierto y vuelto hácia el norte, ha dado un toque; al punto el eco ha reproducido fielmente este mismo toque aunque un tono más bajo; cuando cesó este eco, otro repitió con tono todavía más bajo y con igual exactitud el mismo toque; al segundo eco ha seguido otro, tan fiel como los anteriores, pero más bajo aún y luégo no se ha oido nada más; se ha hecho varias veces la misma prueba, dando siempre el mismo resultado.» *(Suplemento á la Enciclopedia.)*

Las reflexiones múltiples se explican muy bien, segun hemos dicho anteriormente, así como la aminoracion de la intensidad del sonido, que es su consecuencia. Por lo que hace al cambio de tono, es una singularidad más difícil de comprender. Al enumerar D'Alembert las condiciones en que se produce el sonido, indica en los siguientes términos la solucion de la cuestion. «Por último, dice, se pueden disponer los cuerpos que producen *eco* de modo que de uno solo resulten muchos ecos que difieren tanto *por lo que respecta al grado del tono* como con relacion á la intensidad ó fuerza del sonido; para lo cual basta hacer que produzcan ecos cuerpos propios para dar la tercia, la quinta y la octava de una nota que se haya emitido con un instrumento.» El ilustre geómetra no se explica más, por lo cual estamos en el caso de dudar si se puede aplicar esta última condicion como se quiera. De todos modos, la descripcion del fenómeno observado en Rosneath no parece dar materia para distintas interpretaciones. Nosotros nos inclinamos á creer que el cambio del tono no era más que una ilusion ocasionada por la disminucion de intensidad.

En el *Curso de física* de Boutet de Monvel vemos mencionado un caso curioso del que pueden convencerse cuantos visitan el Panteon. En uno de los sótanos del monumento «basta que el guardian que guia á los visitantes dé un golpe seco en el faldon de su gaban, para que resuene en aquellas bóvedas sonoras un estampido comparable con el de un cañonazo.» Este es un fenómeno de resonancia y de concentracion del sonido.

Hé aquí un fenómeno análogo:

«Colocándose, dice Tyndall, en lo alto del muro superior del Coloseum de Lóndres, edificio circular de 43 metros de diámetro, Wheatstone notó que cada palabra pronunciada era repetida gran número de veces. La más sencilla exclamacion producia como una carcajada, y al rasgar un pedazo de papel parecia oirse una granizada.»

En las obras antiguas y modernas se hace mencion de un gran número de ecos múltiples, cuyos efectos más ó ménos sorprendentes merecerian comprobacion, si bien se explican todos sin dificultad atribuyéndolos á reflexiones sucesivas del sonido. Entre estos ecos figura el que habia, segun se dice, en la tumba de Metela, hermana de Craso, cuyo eco repetia hasta ocho veces un verso entero de la *Eneida*. Adisson hace mencion de un eco que reproducia hasta cincuenta y seis veces el estampido de un pistoletazo; estaba situado como el de Simonetta en Italia. El eco de Verdun, formado por dos grandes torres que distaban 52 metros en-

tre sí, repetia doce ó trece veces la misma palabra. En la gran pirámide de Egipto hay salas subterráneas precedidas de largos pasadizos, en que el eco repite diez veces los sonidos.

«Las vibraciones, dice M. Jomard, repercutidas sucesivamente, recorren todos aquellos pasadizos de superficies lisas, dan contra todas aquellas paredes, y llegan lentamente hasta la salida exterior, debilitadas y parecidas al lejano estampido del trueno. En el interior, el ruido decrece con regularidad, y su extincion gradual, en medio del profundo silencio que reina en aquellos lugares, no deja de llamar la atencion y de excitar el interés del observador.»

Finalmente, Barthius habla de un eco situado cerca de Coblenza, orillas del Rhin (entre Coblenza y Bingen, donde el Nahe desemboca en dicho rio), que repetia diez y siete veces la misma sílaba, con la particularidad de que, al paso que no se oia casi á la persona que hablaba, las repeticiones producidas por el eco formaban sonidos muy distintos y con variaciones sorprendentes; ora parecia alejarse el eco, ora se acercaba, unas veces se percibia con toda claridad el sonido y otras era casi imperceptible; esta persona no oía más que una sola voz, miéntras que aquella oía muchas, y el eco estaba á la derecha para unos, y á la izquierda para otros. Análogas particularidades se observaban en un eco descrito en las Memorias de la Academia de ciencias para 1692, y que estaba situado en Genetay, á dos leguas de Rouen, cerca de la abadía de San Jorge, eco formado en un patio semicircular, cercado de paredes semicirculares tambien. D'Alembert da en la *Enciclopedia* una explicacion muy sencilla de los fenómenos que quedan descritos, todos los cuales se deducen, con arreglo á las leyes de la reflexion, de la forma circular del recinto y de las posiciones respectivas ocupadas en medio del patio por la persona que emitia sonidos y por sus oyentes.

Hace unos veinte años vivia yo á orillas del mar en las islas Hyeres, y tuve ocasion de oir uno de los ecos más asombrosos de que he sido testigo. Toda una mañana estuvieron repercutiendo las detonaciones de la artillería de un buque fondeado en la rada, en los costados de la montaña de la costa, produciendo ecos tan prolongados que al pronto me hicieron creer que habia cerca toda una escuadra; parecian estampidos de truenos. Una sola descarga duraba casi un minuto. Es probable que las nubes contribuyeran entónces á la prolongacion de esos efectos extraordinarios de reflexion del sonido.

Y en efecto, las nubes reflejan el sonido como los edificios, las rocas, las piedras y los árboles, siendo probable que el fragor del trueno reconozca por causa las reflexiones sucesivas del sonido, del suelo á las nubes y viceversa, así como de las nubes entre sí. La detonacion propiamente dicha que acompaña á la descarga eléctrica de las nubes es un fenómeno instantáneo como la chispa misma; cuando ménos es brevísima la duracion de dicha detonacion, aunque tal vez exceda á la del relámpago. Para convencerse de ello basta observar que el trueno parece tanto más seco y breve cuanto más pronto sucede al relámpago, es decir, cuanto á menor distancia del observador estalla. En este caso, el fragor que le sigue y que parece cada vez más débil, es indudablemente una sucesion de ecos.

Hay sin embargo que tener en cuenta la circunstancia de que el relámpago ocupa una extension considerable, que puede calcularse en centenares de metros y á veces en uno ó dos kilómetros; que traza curvas sinuosas y que las diferentes partes que lo forman se hallan á distancias notablemente variables del observador. Si se admite que la detonacion tiene orígen á lo largo del surco luminoso, y, por decirlo así, en el mismo instante de un extremo á otro, claro está que el sonido llegará sucesivamente al oído, y además, con muy diferente intensidad, de suerte que al parecer durará de cinco á seis segundos, despues de los cuales se percibirán los sonidos engendrados por la reflexion en las nubes ó en el suelo, es decir, por el fenómeno del eco, resultando entónces lo que constituye el fragor del trueno.

Al enumerar D'Alembert los cuerpos propios para reflejar el sonido y formar eco, cita las nubes, y añade: «De aquí proceden esos terribles estampidos del trueno que brama, y cuyos ecos repetidos retumban en el aire.»

Arago apunta en su dictámen sobre la velocidad del sonido la circunstancia de que todos

los cañonazos disparados en Montlhéry iban acompañados de un fragor semejante al del trueno y que duraba de 20 á 25 segundos. En Villejuif no se observaba otro tanto: sólo cuatro veces, y con ménos de un segundo de intervalo, se oyeron dos estampidos distintos del cañon de Montlhéry. Por último «en dos circunstancias siguió á la detonacion un fragor prolongado: estos fenómenos no se han presentado jamás sino en el momento de aparecer algunas nubes; cuando la atmósfera estaba completamente despejada, el ruido era único é instantáneo.» ¿No será permitido deducir de esto que los disparos múltiples del cañon de Montlhéry que se oian en Villejuif resultaban de ecos formados en las nubes, y considerar esta circunstancia como un argumento favorable para la precedente explicacion del fragor del trueno?

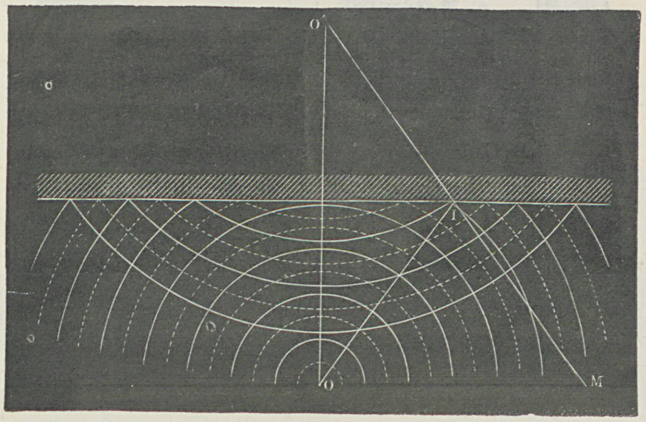


Fig. 267.—Ley de la reflexion de las ondas sonoras

III

LEYES DE LA REFLEXION DEL SONIDO

Estos son los hechos: veamos ahora á qué leyes obedece la reflexion del sonido, leyes sencillísimas que, segun se demuestra rigurosamente, son consecuencia natural del movimiento vibratorio que constituye el sonido, y que se comprueban experimentalmente sin necesidad de recurrir á hipótesis.

Dase el nombre de *rayo sonoro* (1) á una línea recta que se supone partida del centro de conmocion; cuando llega á ponerse en contacto con una superficie reflectora forma lo que se llama *rayo incidente*, siendo el *rayo reflejado* la línea en cuya direccion vuelve á salir de esta superficie hácia el centro de donde emana. Los dos ángulos que los rayos incidente y reflejado forman con la perpendicular ó normal al punto de incidencia son los ángulos de incidencia y de reflexion.

Comprendidas bien estas definiciones, véase cómo se enuncian las dos leyes de la reflexion del sonido:

PRIMERA LEY.—*El rayo sonoro incidente y el reflejado se hallan en un mismo plano perpendicular á la superficie reflectora.*

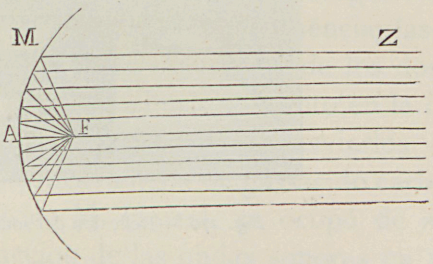


Fig. 268.—Parábola: reflexion en el foco de los rayos paralelos al eje

SEGUNDA LEY.—*El ángulo de reflexion es igual al de incidencia.*

La comprobacion práctica de estas dos leyes es sumamente sencilla. Para ello se ponen frente á frente, y de modo que sus ejes coincidan, dos espejos metálicos de forma parabólica, es

(1) La expresion *rayo sonoro* es una abstraccion. En realidad, el movimiento vibratorio de un foco produce en el medio gaseoso en que se propaga el sonido, una sucesion de ondas esféricas; formadas de capas alternativamente dilatadas y condensadas. En los fenómenos de reflexion y refraccion cuyas leyes vamos á enunciar, estas ondas son las que en realidad se reflejan contra un obstáculo, ó se rompen al pasar á un medio diferente. Por ejemplo, siendo O (fig. 267) el foco sonoro, AB el plano en el cual van á reflejarse las ondas sonoras, y M un punto cualquiera en que se coloca el observador para recibir estas ondas reflejadas, se demuestra que todo resulta como si el foco estuviese en O', punto simétrico del punto O tras el plano; en una palabra las ondas reflejadas tienen el punto O' por centro. Los rayos sonoros OI, O'I, perpendiculares á las ondas directas y de retroceso, son lo que se llama el *rayo incidente* y el *rayo reflejado* en el punto I del plano.

decir, resultante de la revolucion alrededor de su eje de la curva llamada *parábola* (fig. 268). Esta curva tiene cerca de su vértice A, un foco F, el cual goza de la propiedad de que todas las líneas FM tiradas desde él á diferentes puntos de la parábola se reflejan en sentido paralelo al eje, como las líneas MZ; más claro, los rayos que parten del foco y las paralelas al eje forman ángulos iguales con las perpendiculares á la parábola en los puntos M. Recíprocamente, si las paralelas al eje encuentran la parábola se reflejarán en el foco.

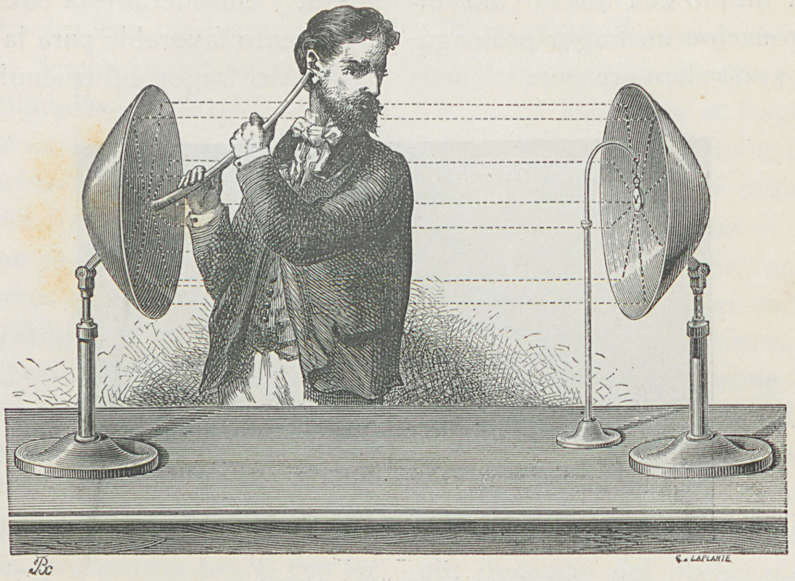


Fig. 269. —Comprobacion práctica de las leyes de la reflexion del sonido

Pues bien, si se pone un reloj en el foco de uno de dichos espejos, las ondas sonoras producidas por el movimiento del volante saldrán paralelamente al eje y despues de chocar con

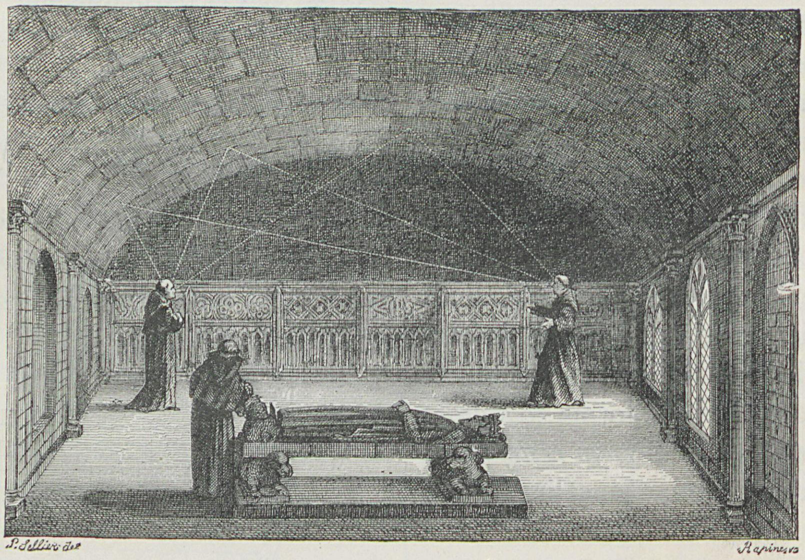


Fig. 270. —Reflexion del sonido en la superficie de una bóveda de forma elíptica

la superficie cóncava del segundo espejo, irán á reflejarse en el foco de este. El observador, provisto de un tubo, con objeto de no interceptar las ondas, percibirá clara y distintamente el ruido del reloj si coloca el extremo del tubo en el fondo del segundo espejo, pero las personas que se sitúen en el espacio que media entre ambos espejos apénas percibirán el rumor del volante ó dejarán de oirlo en absoluto, aunque se coloquen á corta distancia del reloj.

La curva llamada *elipse* tiene dos focos, y los rayos emanados de uno se reflejan en el otro. Las salas que tienen la bóveda de forma elíptica deben presentar por consiguiente el mismo fenómeno que los dos espejos parabólicos, y así lo confirma efectivamente la experiencia. En

el Museo de antigüedades del Louvre hay una sala de esta clase, en la que dos personas situadas en los dos extremos opuestos pueden hablar en voz baja, sin temor á la indiscrecion de las personas que pudieran escucharlas colocadas en una posicion intermedia. Utilízase la reflexion del sonido en muchos instrumentos que tendremos ocasion de describir cuando nos ocupemos de las aplicaciones de la acústica á las ciencias y á las artes.

IV

REFRACCION DEL SONIDO

Hemos visto que el sonido se propaga por intermedio de todos los medios elásticos, pero en cada uno de ellos con desigualdad y con velocidades que dependen en cierto modo de la densidad del medio atravesado. Cuando el sonido pasa de un medio á otro, como cambia su velocidad, resulta una desviacion del rayo sonoro, la cual lo aproxima á la perpendicular á la superficie de separacion de los dos medios, si la velocidad es menor en el segundo que en el primero. Como la luz experimenta una desviacion parecida, comprobada por la experiencia mucho ántes de conocer su verdadera explicacion teórica, y como há largo tiempo que se conoce este fenómeno con el nombre de *refraccion*, se ha dado el de *refraccion del sonido* á la desviacion de los rayos sonoros. Véase cómo M. Sondhaus ha hecho patente esta desviacion.

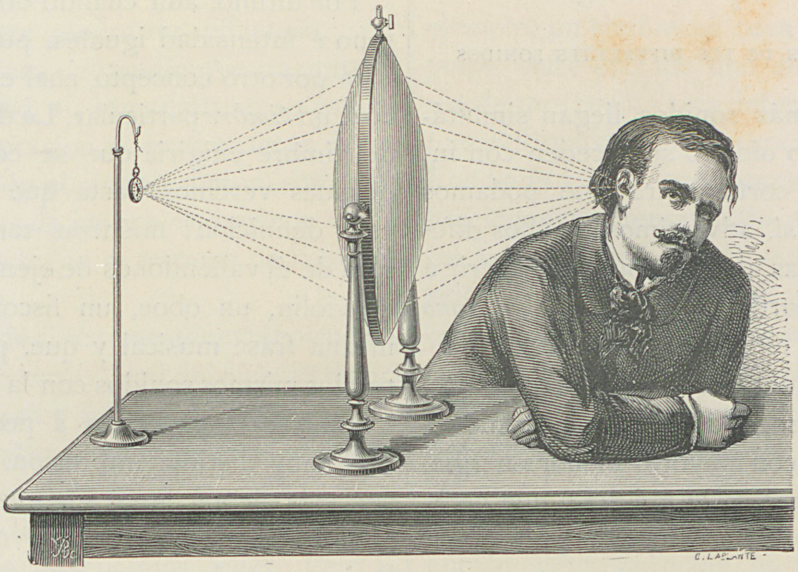


Fig. 271. — Refraccion de las ondas sonoras. Lente de Soudhans

Con membranas de colodion hizo un saco de forma lenticular y lo llenó de gas ácido carbónico. La velocidad del sonido es en este gas menor que en el aire. Los rayos sonoros que van á dar en la superficie esférica de la lente se refractan al pasar al través del gas, y cuando salen por la superficie opuesta deben converger en un punto único ó foco. Y en efecto, si se pone un reloj por ejemplo (fig. 271), en el eje de esta lente biconvexa, reconócese que en el eje y al otro lado hay un punto en que el ruido del volante se oye distintamente y mucho mejor que en cualquiera otra parte; por consiguiente, hay convergencia de ondas sonoras hácia el punto del eje de la lente de que se trata, y por lo tanto refraccion del sonido.

Llenando de gas hidrógeno una lente bicóncava se podria tambien comprobar el fenómeno de la refraccion del sonido. Hemos visto que la velocidad de este en el hidrógeno es mayor que en el aire; en su consecuencia, las superficies convexas de separacion de los dos medios deben producir el mismo efecto en la direccion de los rayos sonoros y desviarlos como la lente bicóncava llena de gas ácido carbónico.

El físico M. Hajech se ocupó de nuevo de la refraccion de las ondas sonoras en 1857 sirviéndose al efecto de prismas llenos de gases y líquidos de diferentes densidades, y averiguó que la refraccion del sonido sigue las mismas leyes que la de los rayos luminosos, y que el índice de refraccion (ó relacion entre los senos de los ángulos de incidencia y de refraccion) es igual á la relacion de las velocidades del sonido en los medios experimentados y en el aire.

CAPÍTULO IV

PROPIEDADES DISTINTIVAS DE LOS SONIDOS

I

CARACTÉRES PROPIOS DE LOS DIFERENTES SONIDOS

Cuando dos ó más sonidos llegan simultáneamente á nuestro oído, ó se suceden con intervalos bastante cortos para que podamos compararlos entre sí, advertimos en ellos diferencias ó semejanzas que se pueden referir á tres propiedades particulares: *intensidad, tono y timbre.*

Un sonido puede ser más ó ménos fuerte, más ó ménos intenso, es decir, puede conmover el órgano del oído con mayor ó menor energía. Unas veces la impresion es tan débil que necesitamos prestar particular atencion para percibirla, y tan fuerte otras, que nos causa una sensacion dolorosa, y áun las detonaciones de las piezas de artillería suelen lastimar los órganos en términos de producir una sordera temporal. Entre ambos extremos de la intensidad de los sonidos y de los ruidos figuran todos los grados posibles de sensacion auditiva.

Pero no por esto son idénticos dos sonidos de igual intensidad. El uno puede ser más *alto*, más *agudo* que el otro, ó si se quiere, el segundo nos parece más *bajo* ó más *grave*. La relacion de gravedad ó agudeza de dos sonidos se llama *tono* ó *altura*. En música, la altura de los sonidos empleados y que por su sucesion ó simultaneidad componen la melodía y la armonía, está sujeta á reglas especiales cuyos principios expondremos más adelante. No todos los sonidos son adecuados á este modo de comparacion que permite asignar su tono; y de aquí resulta esa distincion entre *ruido* y *sonido musical*, aplicándose la primera denominacion á los sonidos cuyo tono no puede apreciar un oído ejercitado, y la segunda á todo sonido regular que forma un grado cualquiera en la serie indefinida de los sonidos empleados en música.

Por último, áun cuando dos sonidos sean de tono é intensidad iguales, pueden diferir tambien por otro concepto, cual es el de tener cada cual un *timbre* particular. La definicion rigurosa del timbre exigiria que se conociera su causa: despues veremos hasta qué punto es posible esta definicion; miéntras tanto, daremos una idea de él valiéndonos de ejemplos. Una flauta, un violin, un oboe, un fiscorno, que tocan la misma frase musical y que, por lo tanto, emiten los mismos sonidos con la misma intensidad é igual tono, producen á pesar de ello en el oído muy distinta impresion. Los del fiscorno son más llenos, más sonoros; los de la flauta más dulces; los del violin y del oboe más chillones y nasales; y por esto se dice que difieren de timbre. El timbre es el que en gran parte establece la diferencia entre las voces (1); y el que nos hace conocer á las personas sin que las veamos. ¿En qué se distinguen las vocales simples ó compuestas y los diptongos? En el timbre, que varía de unas á otros.

Sentadas estas definiciones, abordemos el estudio físico de las cualidades de los sonidos: intensidad, tono y timbre.

II

INTENSIDAD DE LOS SONIDOS

Para que haya sonido se requiere el concurso de tres elementos: un foco sonoro, es decir, que se ponga en vibracion un cuerpo que es el cuerpo sonoro propiamente dicho, que haya un medio capaz de trasmitir estas vibraciones, en una palabra, el órgano del oído que las percibe.

(1) Hay otras causas de diferencias entre las voces de varias personas; mil modos, propios de cada cual, de acentuar las largas y las breves, de marcar el ritmo, sin contar esos ligeros matices en el tono de los sonidos, que áun en la prosa hablada, forman una especie de melodía, ó por lo ménos de recitado.

De aquí se siguen tres géneros de influencia de los cuales depende la intensidad de un sonido. El volúmen, la forma del cuerpo sonoro, y la naturaleza de la materia que lo compone, el modo de conmocion que se emplea para hacerle entrar en vibracion, la energía del movimiento que reciben así sus moleculas, son otras tantas circunstancias que hacen variar la amplitud de las vibraciones del cuerpo, y por consiguiente lo que se puede llamar *intensidad intrínseca* del sonido.

Tal es el primer género de influencia.

Pero la naturaleza del medio que trasmite el sonido, su densidad, su temperatura, su estado de reposo ó de agitacion, su extension, es decir, la distancia del oído al cuerpo sonoro, son tambien circunstancias de las cuales depende dicha intensidad; pero aquí no se trata ya de la intensidad intrínseca.

Lo propio sucede si se tiene además en cuenta la mayor ó menor sensibilidad del oído, es decir, del órgano que recibe las ondas sonoras en la persona que percibe el sonido: el oído puede estar más ó ménos ejercitado, y nadie ignora hasta dónde llega la aptitud de los salvajes para percibir los ruidos lejanos más leves. Pero la sensibilidad del oído puede depender en un mismo individuo de circunstancias puramente particulares, aumentándola notablemente la carencia completa de cualquier otro sonido distinto del que se escucha, y disminuyendo, por el contrario, á causa de una porcion de ruidos simultáneos, que el oído se acostumbra á oir y que por último no distingue ya, por decirlo así, pero que menguan su facultad de audicion.

Ocupémonos de todas estas causas modificadoras de la intensidad de los sonidos, por el órden en que las hemos enumerado.

La amplitud de las vibraciones da al sonido mayor ó menor intensidad, como se puede comprobar mediante gran número de experimentos familiares. Cuando se pulsa ó se frota con el arco la cuerda de un violin ó de cualquier otro instrumento análogo, el sonido va debilitándose á medida que el movimiento de vaiven de la cuerda es ménos marcado. Cuanto más vigoroso es el frotamiento del arco, más marcadas son las oscilaciones y mayor tambien la intensidad del sonido. Pero como no por esto resulta modificado su tono musical (1), debe deducirse que cada oscilacion de la cuerda se efectúa con mayor rapidez, siendo más considerable el camino recorrido en un espacio de tiempo igual cuando la amplitud es asimismo más considerable.

Por lo demás, cuando un cuerpo elástico produce un sonido, no todas las moléculas de que se compone se separan por igual de su posicion de equilibrio, pues, como veremos más adelante, no faltan algunas que continúen inmóviles. Por ejemplo, un timbre en cuya superficie se da un golpe, sufre en cada uno de los anillos circulares de que consta una deformacion que le hace tomar formas elípticas opuestas y alternadas. Los anillos de la base propenden á ejecutar vibraciones más lentas y de mayor amplitud que los anillos inmediatos al vértice. Pero la solidaridad de los anillos produce una compensacion entre esas varias amplitudes y velocidades, resultando de aquí, por lo que respecta al sonido producido, un tono y una intensidad medias que dependen de las dimensiones y de la naturaleza del metal del timbre. Existe aquí evidente analogía con las oscilaciones del péndulo compuesto, cuya duracion es, segun sabemos, un promedio entre las de las oscilaciones de una serie de péndulos simples de longitudes diferentes.

En todo lo que acabamos de decir sólo se trata de la intensidad intrínseca del sonido, que depende únicamente de la amplitud de las vibraciones ejecutadas por las moléculas de los cuerpos sonoros. Pero como el sonido llega á nuestro oído por intermedio del aire, la intensidad parecerá tanto mayor cuanto más considerable sea el volúmen de aire agitado á la vez, y por consiguiente, cuanto mayores sean las dimensiones del cuerpo sonoro. Una cuerda tendida sobre un pedazo de madera angosto produce un sonido ménos fuerte que si lo está sobre una mesa ó caja resonante, como en el violin, el piano y otros instrumentos de música. Todos sabemos que si se hace vibrar un diapason, primero al aire y luégo apoyando este pequeño instrumento en una mesa ó en cualquier otro cuerpo elástico, el sonido primitivo adquiere mucha

(1) Más adelante veremos que el tono está en relacion directa del número de vibraciones efectuadas en un mismo espacio de tiempo, como por ejemplo, en un segundo.

mayor intensidad á causa del mayor volúmen del cuerpo vibrante.

La intensidad de un mismo sonido percibida por el oído á diferentes distancias, decrece en razon inversa del cuadrado de estas, siendo aquella á 10 metros cuatro veces mayor que á 20, nueve más que á 30, etc.; con tal que las circunstancias de la propagacion continúen siendo las mismas y que no haya cuerpos reflectores inmediatos que contribuyan á reforzar el sonido. De aquí resulta que si en dos puntos diferentes se producen dos sonidos, uno de los cuales tenga cúadruple intensidad que el otro, el observador que se coloque en el tercio de la línea que los separa, hácia el lado más débil, creerá oir dos sonidos de igual fuerza. Por lo general, si el oyente se sitúa en un punto de la línea que reune los dos cuerpos de donde emanan ambos sonidos y en el que le parezcan iguales sus intensidades, estas serán proporcionales á los cuadrados de las distancias del punto intermedio á los dos cuerpos sonoros.

Véase cuál es la razon de esta ley. Al propagarse las ondas sonoras esféricamente alrededor del centro de conmocion, ponen en movimiento secciones esféricas sucesivas, cuyo volúmen, en igualdad de espesor de las capas, está en razon directa de su superficie y crece por lo tanto como los cuadrados de sus distancias al centro. Como las masas de aire que forman las capas agitadas son cada vez mayores, el movimiento que la misma fuerza les comunica disminuye en la misma proporcion.

En las columnas ó tubos cilíndricos, las secciones sucesivas son iguales, y por consiguiente la intensidad de los sonidos deberia ser siempre la misma, cualquiera que fuese la distancia. Sin embargo, los recientes experimentos de M. Regnault prueban que en realidad hay cierta disminucion de intensidad que crece con la distancia y que procede en gran parte de la reaccion de las paredes del tubo que limitan la columna de aire. Con todo, á cortas distancias, la atenuacion del sonido es muy poco marcada. M. Biot se cercioró en los experimentos que hizo para averiguar la velocidad del sonido en los cuerpos sólidos, de que el trasmitido por el aire en los tubos de los acueductos de Paris no se debilitaba de un modo apreciable sino despues de recorrer un kilómetro próximamente.

«A esta distancia, dice Biot, se oia la voz más baja de modo que se podian distinguir perfectamente las palabras y seguir una conversacion. Quise conocer el tono en que la voz dejaba de ser perceptible, y no pude conseguirlo. Se oian y discernian las palabras pronunciadas en voz tan baja como cuando se habla al oido; de suerte que para que dos personas no se oyeran, no quedaba absolutamente otro medio sino el de no hablar.»

Digamos de paso que para hacer con éxito esta clase de experimentos es preciso elegir las horas más silenciosas de la noche, segun lo aconseja el mismo Biot, por ejemplo, de una á dos de la madrugada.

«De dia, mil ruidos confusos agitan el aire exterior, hacen resonar los tubos é impiden distinguir y áun extinguen las tenues conmociones producidas por una voz baja en el extremo de la columna de aire. En estas circunstancias, ni siquiera se oyen los ruidos más fuertes.»

Estas propiedades de los canales cilíndricos explican ciertos efectos de acústica que se advierten en las salas ó en las bóvedas de varios monumentos. Las aristas de estas ó de las paredes forman canales en los cuales se propaga el sonido con facilidad suma y sin perder nada de su intensidad primitiva. En Paris hay dos salas de esta clase: una, de forma cuadrada y abovedada, en el Conservatorio de artes y oficios; otra, exagonal, en el Observatorio. En una y otra los ángulos se reunen en la bóveda y producen á modo de canales muy á propósito para conducir el sonido sin debilitarlo; de suerte que dos personas pueden hablar en voz baja, de un ángulo á otro, sin que las situadas entre ellas puedan percibir nada de su conversacion.

La cúpula de San Pablo en Lóndres ofrece análoga disposicion, citándose además la galería de Glocester, la catedral de Agrigento en Sicilia y la famosa gruta de Siracusa conocida hoy con el nombre de *Grotta della Favella* y en la antigüedad con el de *Oreja de Dionisio* (figura 272), porque, segun se dice, el tirano de este nombre habia hecho abrir una comunicacion secreta entre su palacio y las cavernas donde tenia encerradas á sus víctimas, aprovechando la disposicion particular de la gruta para espiar sus menores palabras.

III

VARIACIONES DE INTENSIDAD DEL SONIDO CON LA ALTURA, EL DIA Y LA NOCHE

La intensidad del sonido percibido varía segun la densidad del medio que lo propaga ó, mejor dicho, del medio en que tiene orígen; y así lo hemos indicado ya al hablar del experimento hecho bajo la campana de la máquina neumática, en la que, segun se recordará, el sonido del timbre disminuye á medida que se hace el vacío. Lo contrario sucederia, segun lo ha comprobado Hauksbee, si se comprimiese el aire en el recipiente en que está colocado el cuerpo sonoro. Las personas que se elevan á las altas regiones del aire, ya á las cumbres de las montañas ó bien en globo, advierten una diminucion en el sonido, producida por la de la densidad del aire atmosférico. Hemos citado ya la observacion de Saussure y la de Tyndall sobre la escasa intensidad de la detonacion de una pistola en la cima del Monte Blanco.

«En los experimentos que se hicieron en Quito para medir la velocidad del sonido entre dos estaciones situadas á 3,000 y 4,000 metros sobre el nivel del mar, el estampido de un cañon de á 9, á 25,500 metros de distancia, hacia tan poco efecto como el de una pieza de á 8, á 31,300 metros en los llanos de las inmediaciones de Paris.» (Daguin.)

Véanse otros hechos curiosos entresacados de los relatos de varios aeronautas: estos hechos prueban que si los sonidos nacen muy débiles en los medios enrarecidos de las altas regiones, se propagan con dificultad por las capas inferiores ménos densas; y por el contrario, los sonidos de abajo se oyen fácilmente en las alturas. Sin embargo, el camino recorrido es el mismo en ambos casos, como tambien son las mismas, aunque en sentido inverso, las densidades de las capas atravesadas por las ondas sonoras. Así pues, la intensidad del sonido depende principalmente, por lo que respecta á la densidad del medio, de la del medio en que está inmediatamente sumergido el cuerpo sonoro, lo cual se explica, pues á igualdad de amplitud de las vibraciones del cuerpo, la masa áerea agitada en el punto de partida es mayor en un medio denso que en otro enrarecido.

El célebre aeronauta Glaisher llegó en su primera ascension, en 1862, á 3,500 metros de altura. «El silencio es allí absoluto, dice, semejante al que reinaba en el abismo cuando la tierra fué separada de las aguas. De pronto oigo una armonía subterránea; no es un eco de la voz de los ángeles, sino una música humana que llega hasta estas regiones en que el aire, ménos denso, parece que sólo desea vibrar.» El mismo aeronauta oyó en otra ascension el ruido del trueno, y eso que el globo se cernia en un espacio absolutamente despejado, á 7,000 metros de altura. La tormenta bramaba muy léjos, á sus piés y en el seno de unas nubes que estaban 5,000 metros más bajas que él. Otra vez oyó el silbido de la locomotora hallándose á 5,000 y 7,600 metros de altura. Las voces humanas se perciben muy bien desde las altas regiones del espacio, al paso que los aeronautas con dificultad pueden hacerse oir aún desde escasas alturas. «Mientras oimos, dice Flammarion, una voz que nos habla á 900 metros debajo de nosotros, no se oyen con claridad nuestras palabras así que nos remontamos á más de 100 metros.»

Las ondas onoras se trasmiten con mayor intensidad en el agua que en el aire, siempre y cuando el cuerpo sonoro vibre con la misma energía en uno y otro medio. Acabamos de ver que en los cuerpos sólidos, de forma cilíndrica ó prismática, se propaga el sonido sin debilitarse tanto como en el aire ó en los gases. Todos conocemos el experimento que consiste en aplicar el oído al extremo de un largo madero, oyéndose así distintamente los ruidos más leves, por ejemplo, el que produce el roce con un alfiler. Los salvajes aplican el oído al suelo para percibir los ruidos lejanos, que el aire no podria trasmitir á la misma distancia.

Un hecho conocido generalmente y de fácil observacion es que el sonido se oye mejor de noche que de dia. Anteriormente hemos tenido ocasion de citar lo que acerca de este hecho dice Humboldt con motivo del ruido de las cataratas del Orinoco, ruido que le pareció tres veces más intenso de noche que de dia. M. Daguin atribuye la causa, en su *Tratado de física*, á la falta de homogeneidad del aire calentado con desigualdad por el sol. Tyndall da la misma explicacion.

«El aumento de intensidad del sonido de

noche, dice Daguin, era cosa conocida ya por los antiguos: Aristóteles la menciona en sus *Problemas* y Plutarco en sus *Diálogos*. Se ha pretendido ver la explicacion de ella en los mil ruidos confusos que llegan al oído durante el dia y que cesan de noche, pero esta explicacion no puede ser aplicable á las selvas del Orinoco, en las cuales una multitud de animales, de insectos nocturnos, llena el aire con sus gritos ó con sus zumbidos. Humboldt ha dado con la verdadera explicacion, haciendo notar que durante la noche el aire es homógeneo y está en calma, lo cual favorece la propagacion del sonido, al paso que de dia está agitado y compuesto de partes de densidad desigual á causa de la accion del sol, que caldea el suelo de muy distinto modo segun la naturaleza y el estado de su superficie. Resulta de aquí que el aire en contacto con él adquiere temperaturas diferentes, y que elevándose las partes más dilatadas y mezclándose imperfectamente con las ménos calientes, el aire inmediato á la superficie de la tierra es poco homogéneo. En virtud de esto un rayo sonoro experimenta una reflexion parcial al pasar de una masa de aire á otra de diferente densidad, de suerte que la porcion de dicho rayo que pasa más alla de esta masa ha perdido parte de su densidad.

»Aristóteles habia sospechado ya esta explicacion, pues atribuia á la calma de la noche la mayor intensidad del sonido, y tambien Plutarco, que, yendo más léjos, veia la causa de la debilidad del sonido durante el dia en el *movimiento temblon* del aire, ó en la accion del sol. Vése tambien por qué el cambio de intensidad del sonido en el mar, entre el dia y la noche, es ménos notable que en tierra, lo cual consiste en que la temperatura de la superficie del agua es mucho más uniforme que la del suelo.»

La razon de esta diferencia es otra, segun Nicholson; en concepto de este físico, está en que durante el dia, impresiona el oido á la vez una multitud de ruidos, cada uno de los cuales debe distinguirse con ménos facilidad. «El silencio de la noche, dice, da reposo á nuestros órganos, haciéndolos más aptos para recibir tenues impresiones: el silencio exalta el oído como la oscuridad aguza la vista.» No nos parece dudoso que el concurso de estas diferentes causas influya para que de noche sea mayor que de dia la intensidad de los sonidos, y por consiguiente su alcance. Más adelante haremos mencion de experimentos interesantes, debidos á Tyndall, los cuales prueban que el asunto dista mucho de estar dilucidado.

Segun las observaciones de Bravais y de Martins, la distancia á que puede llegar un sonido depende tambien de la temperatura del aire, siendo mayor durante los frios del invierno, en las regiones glaciales del polo ó de las altas montañas; débese atribuir la causa de esto á la homogeneidad del aire más bien que á su densidad, toda vez que esta es menor en la montaña que en el llano. Por otra parte, allí tambien está más exaltada la sensibilidad del oído; en las regiones polares, lo mismo que en las altas montañas y que en las capas elevadas del aire á las que se ha podido llegar en globo, reina siempre un silencio casi absoluto, y los mil confusos ruidos de las regiones habitadas no contrarian allí la audicion de un sonido único. Esos ruidos innumerables deben actuar en nuestro oído del mismo modo que actúa de dia la luz difusa del aire, la cual nos impide ver las estrellas, tan fáciles de distinguir en la oscuridad.

La intensidad de los sonidos trasmitidos depende sin duda del reposo ó agitacion del aire. Estos se oyen distintamente á gran distancia cuando el tiempo está en calma; el viento los debilita, áun cuando procedan del punto en que resuena el cuerpo sonoro, y así lo comprobó Derham en Porto-Ferrajo (isla de Elba), donde se oian mejor los cañonazos disparados en Liorna estando la atmósfera tranquila que cuando el viento soplaba, áun siendo su direccion la de Liorna á Porto.

Así pues, el viento debilita el sonido, disminuye su alcance tanto más cuanto más opuesta es la direccion en que sopla, llegando su influencia al minimum cuando su direccion está en ángulo recto con el movimiento de las ondas sonoras. Por último, la disminucion es más marcada en los sonidos débiles que en los fuertes. Quizás no dependa enteramente de la agitacion de las moléculas del aire la influencia del viento en el alcance de los sonidos, inclinándonos á creer que el ruido mismo del viento entra por algo en ello. Tan luégo como sopla con alguna fuerza, produce el efecto de un bajo con-

tinuo que debe hacer ménos viva la sensibilidad del oído. La direccion de las vibraciones, es decir, la posicion que el observador ocupa relativamente al punto del que parte el sonido, ejerce tambien gran influencia en la intensidad de este. Si cuando un cazador hace resonar un cuerno de caza, vuelve el pabellon del instrumento en varias direcciones, la intensidad del sonido varía hasta el punto de que tan pronto parece que se acerca como que se aleja del sitio en que se encuentra el oyente: por lo general, todo obstáculo interpuesto, sobre todo tratándose de un cuerpo cuya masa trasmite mal las vibraciones, impide que se propague el sonido;

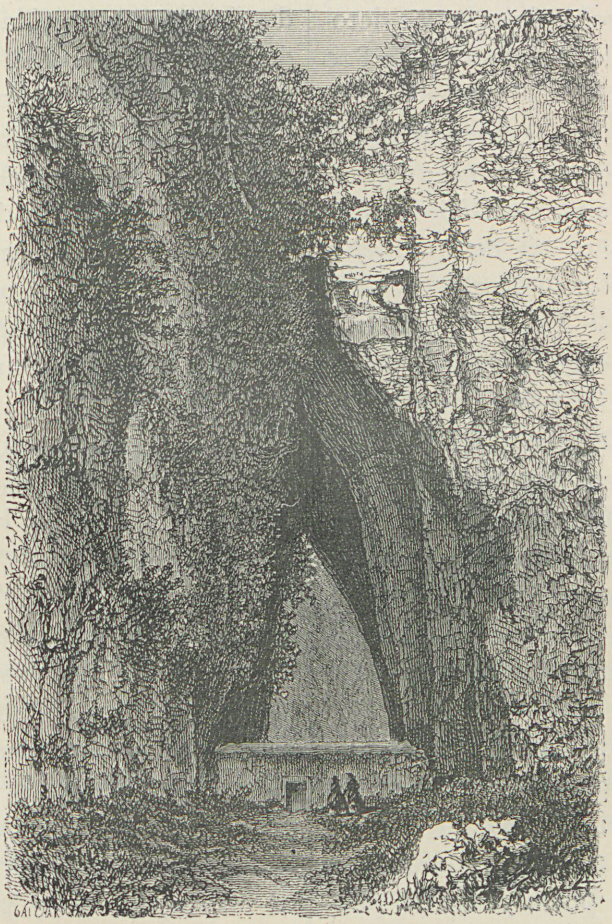


Fig. 272.—Gruta *della Favella*, ú *Oreja de Dionisio*

fórmase tras él á modo de una sombra sonora, y la intensidad del sonido resulta notablemente alterada.

IV

DEL ALCANCE DE LOS SONIDOS

El límite á que un oído de regular sensibilidad cesa de percibir un sonido es lo que se llama su *alcance*. La razon y la experiencia concuerdan para demostrar que este límite depende desde luégo de la intensidad intrínseca de la conmocion sonora, así como de todas las demás circunstancias que modifican la intensidad del sonido á lo largo del trayecto que recorre para llegar hasta el oído. Así pues, el alcance de aquel debe variar con la naturaleza del medio en que se propaga, con la densidad de este medio, su temperatura, el estado de sosiego ó agitacion del aire y probablemente tambien con la cantidad de vapor de agua que contiene, en una palabra, con la mayor ó menor homogeneidad de sus capas sucesivas. Conviene entrar por este concepto en algunos detalles, pues la cuestion tiene un punto de vista práctico de cierta importancia, en especial por lo que respecta á la eficacia de las señales sonoras de que se hace uso en la marina, en los ferro-carriles, etcétera, cuando á causa de las nieblas no se pueden hacer señales luminosas.

Las circunstancias capaces de modificar la intensidad de un sonido son muy varias, como lo prueban los casos anteriormente citados, si-

guiéndose de aquí que es muy difícil determinar la mayor distancia á que puede llegar. En los ejemplos notables de sonidos oidos á distancias considerables, que citan los físicos, es probable que el suelo, más bien que el aire, sirviese de vehículo á las vibraciones sonoras. Más arriba hemos mencionado lo que dice Humboldt acerca de las detonaciones producidas por los terremotos ó por las erupciones volcánicas, cuyas detonaciones se han propagado á distancias de 800 á 1200 kilómetros.

Chladni cita muchos casos que prueban que el estampido del cañon se propaga á veces á grandísimas distancias: en el sitio de Génova se le oyó á 90 millas italianas; en el de Manheim, en 1795, se le oyó en Nordlingen y Wallerstein, al extremo opuesto de Suabia; en la batalla de Jena, entre Wittenberg y Treuenbrietzen. «Yo mismo he oido, dice, el ruido de los cañonazos disparados en Wittenberg, á 17 millas alemanas (126 kilómetros) de distancia, no tanto por intermedio del aire como por las conmociones de los cuerpos sólidos, apoyando la cabeza contra una pared.»

En el acta de la sesion de la Academia de ciencias del 15 de enero de 1840, se hizo constar lo siguiente:

«M. Arago comunica ciertos informes proporcionados por M. Hacqueville, acerca de *las distancias hasta las cuales se propaga el sonido*. El cañoneo que precedió á la toma de Paris á principios de 1814, se oyó por espacio de quince horas en toda la comarca que se extiende desde Lisieux hasta Alençon y en todos los valles circunvecinos (170 á 180 kilómetros á vista de pájaro). Elías de Beaumont añade en apoyo del aserto de Hacqueville que el cañoneo de 1814 se oyó distintamente en el distrito de Canon, entre Lisieux y Caen, á unos 126 kilómetros de Paris, en línea recta.

En estas circunstancias, que no son por cierto excepcionales, ¿se trasmitia el sonido por intermedio del aire ó por el del suelo? La verdad es que aquel se propaga con frecuencia á gran distancia por el aire mismo, como lo prueba el fragor del trueno, y más especialmente las detonaciones de los bólidos que á veces estallan á enormes alturas. Chladni habla de meteoros cuya explosion no se oyó sino á los diez minutos de verse el globo luminoso, lo cual supone una altura de 200 kilómetros cuando ménos. El bólido observado en el mediodía de Francia el 14 de mayo de 1864 presentó la misma particularidad, notándose que trascurrieron hasta cuatro minutos entre la aparicion del meteoro y la percepcion del ruido de la detonacion. M. Daubrée dice con este motivo:

«Para que una explosion producida en capas de aire tan enrarecidas ocasione en la superficie de la tierra un ruido de semejante intensidad y en una extension horizontal tan considerable, se requiere que su violencia en las altas regiones exceda á todo cuanto conocemos.»

La duracion de la detonacion de ciertos bólidos es un fenómeno no ménos notable; probablemente hay en él un efecto de repercusion del sonido en las capas de desigual densidad del aire, análoga al fragor del trueno en las tormentas.

Consistiendo el sonido en la impresion que produce en el órgano del oido la sucesion de las vibraciones ó de las ondas sonoras, puede suceder, como sucede en efecto, que la impresion cese ántes que el movimiento vibratorio, causa de esta impresion, haya cesado á su vez. Regnault comprobó perfectamente esta distincion en sus experimentos sobre la velocidad del sonido. «Cuando la onda, dice, no tiene ya suficiente intensidad, ó *se ha modificado lo bastante* para no producir ya en nuestro oído la sensacion del sonido, todavía es capaz, áun despues de un trayecto muy prolongado, de marcar su llegada en nuestras membranas.» El ilustrado físico observó que una pistola, cargada con un gramo de pólvora, produce al dispararse una detonacion que deja de percibirse despues de recorrer el sonido trayectos de

1150	metros en un tubo de	108	milímetros de diámetro	
3810	— —	de 300	—	—
9540	— —	de 1100	—	—

El alcance del sonido es sensiblemente proporcional al diámetro del tubo ó de la columna de aire que lo propaga; pero la onda que, á las distancias que acabamos de indicar, no da ya sonido perceptible, sigue caminando, sin extinguirse casi completamente hasta recorrer las distancias siguientes:

4056	metros en la cañería de	108	milímetros
11430	— —	de 300	—
19851	— —	de 1100	—

El alcance del sonido perceptible y el alcance limitado de las ondas silenciosas deben de ser mucho menores en el aire libre que en un espacio limitado, porque en el primero disminuye rápidamente la amplitud de las vibraciones á consecuencia de la intensidad del sonido: teóricamente hemos dicho ya que esta disminucion es proporcional al cuadrado de las distancias. Creíase que la intensidad era constante en una columna cilíndrica, lo que habria dado al alcance un valor infinito, pero los experimentos de Regnault prueban que no es así; las ondas se debilitan poco á poco hasta que se extinguen por la influencia de las paredes de los tubos. Por lo que hace á las ondas sonoras propiamente dichas, vése que el límite de percepcion ó alcance es bastante reducido.

V

DE LA TRASPARENCIA Y OPACIDAD ACÚSTICAS DE LA ATMÓSFERA

Llegamos ya á los experimentos de Tyndall sobre el alcance de las ondas sonoras, experimentos interesantes por cuanto en muchos puntos se hallan en contradiccion con las ideas generalmente admitidas por los físicos acerca de este asunto. Ya hemos visto que hasta ahora se habia considerado un tiempo claro y sereno como muy favorable para la propagacion del sonido; tambien se creyó que el alcance era mayor si el viento soplaba en direccion del movimiento de las ondas, con tal que aquel fuese una brisa ligera. Véase, pues, cómo los hechos desmienten esta opinion.

La corporacion de Trinity House habia dado al físico inglés el encargo de «determinar la distancia á que podian oirse en el mar las señales que comunmente se hacen en casos de niebla, como el porta-voz, las trompetas marinas, los silbatos de vapor y los cañonazos, y además, de averiguar las causas de las variaciones en esta distancia, dependientes de las mudanzas en las condiciones atmosféricas. Habiéndose preparado convenientemente las señales en lo alto de las peñas del South Foreland, cerca de Dover, M. Tyndall pasó á bordo de un vapor que el gobierno habia puesto á su disposicion, y se fué alejando ó acercando á la costa hasta que las señales eran perceptibles. Llamáronle desde luégo la atencion las variaciones singulares y al parecer inexplicables que se presentaron en breve. Por ejemplo, siendo favorable el 25 de junio la direccion del viento, se oyó distintamente en el mar á 5½ millas inglesas de distancia, ó sean 8750 metros en números redondos, el sonido de la trompeta marina así como el estampido de una pieza de á 18 disparada desde las peñas de Dover. Al dia siguiente, 26, estos mismos sonidos eran perceptibles á 17 kilómetros de la costa, á pesar de ser el viento directamente contrario. El 1.° de julio, aunque soplaba viento contrario y la bruma era muy densa, percibiéronse los sonidos á 20½ kilómetros de distancia, ó sea vez y media más de la que mediaba cuando se oyeron con tiempo claro y viento favorable. El 2 de julio sobrevino de pronto en la atmósfera una opacidad acústica verdaderamente extraordinaria; el estampido de los cañonazos apénas fué perceptible á 6750 metros de la costa, sin causa meteorológica aparente. El 3, haciendo un tiempo sereno y caluroso, y estando el mar perfectamente tranquilo, hubo precision de acercarse hasta 3500 metros de la costa para que se oyera el ruido del cañon de á 18. El observador divisaba muy bien el humo de los fogonazos, pero no percibia el más leve ruido. Parece pues demostrado que la atmósfera clara y despejada no es en modo alguno favorable para la propagacion del sonido, y que la concordancia entre la trasparencia óptica y la acústica, consignada por el doctor Derham en las *Transacciones filosóficas* para 1708, y admitida generalmente desde entónces, carece de fundamento.»

Antes de pasar adelante y de dar á conocer la explicacion que propone Tyndall para estas anomalías, debemos decir que los hechos observados por él no son enteramente nuevos. Arago consigna en su dictámen sobre los experimentos hechos en 1822 en Villejuif y en Montlhéry una diferencia singular entre la intensidad del sonido percibido en cada estacion. «El tiempo estaba sereno y casi enteramente tranquilo, dice; el escaso viento que hacia soplaba de Villejuif á Montlhéry ó hablando con más propiedad, del N. N. O. al S. S. E. En Villejuif oíamos perfectamente los cañonazos disparados en Montlhéry, así fué que nos quedamos sorprendidos en alto grado al dia siguiente cuando nos

dijeron que las detonaciones de nuestra estacion apénas llegaban á la otra.» En Montlhéry no se oyeron más que siete disparos de cada doce. Al otro dia el resultado fué aún más sorprendente, pues sólo se oyó un disparo de cada doce. Arago no se ocupó en explicar estas singularidades, porque, segun dice, sólo podia basarlas en conjeturas desprovistas de pruebas.

El hecho que acabamos de citar es tanto más curioso cuanto que en él se trata de sonidos casi simultáneos, que se propagan en el mismo medio en condiciones meteorológicas que casi se pueden considerar idénticas. Así, un mismo medio aéreo que, en un sentido, goza de la propiedad á que Tyndall da el nombre de *trasparencia acústica*, resulta opaco para el sonido en el sentido opuesto.

Cuando Martins y Bravais midieron la velocidad del sonido entre la cumbre del Faulhorn y el lago de Brienz, notaron tambien que el sonido llegaba debilitado á la estacion inferior; pero en este caso la causa de la disminucion de intensidad podia y debia atribuirse á la gran diferencia de altitud, es decir á la densidad del aire que era menor en el punto donde se producia el sonido. En Montlhéry sucedia lo contrario, toda vez que las ondas sonoras emanadas de Villejuif se propagaban subiendo 30 y más metros hácia la estacion opuesta.

La explicacion propuesta por Tyndall no es otra sino la de Humboldt, esto es, la falta de homogeneidad de las capas de aire á través de las cuales se propagan las ondas sonoras. Cuando se hizo el 3 de julio la última experiencia anteriormente citada, el tiempo estaba sereno y caluroso. «Los rayos de un sol ardiente, al caer sobre el mar, debian producir forzosamente una copiosa evaporacion: en concepto del sabio inglés, el vapor así formado no debia mezclarse con el aire de modo que formara con él un conjunto homogéneo, sino que los espacios desigualmente saturados de la atmósfera debian quedar separados por superficies aptas para la produccion de ecos parciales por reflexion, resultando de aquí menor intensidad en las ondas y la consiguiente disminucion en el alcance del sonido. Un hecho observado el mismo dia confirmó á su parecer la verdad de esta explicacion: presentóse una nube bastante densa para velar el sol, y la evaporacion contenida en tanto, permitió que la mezcla de aire y de vapor ya formado fuese más homogénea; á los pocos minutos, el alcance del sonido se elevó de 3500 á 3750 metros; fué creciendo hasta el anochecer á medida que el sol se acercaba al horizonte, y cuando el astro se puso, oíanse los cañonazos á doce kilómetros y medio de distancia.»

El efecto de un copioso aguacero fué análogo al de la interposicion de la nube. «En la mañana del 8 de octubre, apénas se percibia el ruido de la explosion de la pieza de á 18 á 8750 metros de la costa inglesa. Al medio dia cayó un fuerte chubasco mezclado con granizo; al punto empezó á reforzarse gradualmente el sonido, y á medida que los observadores se fueron alejando de la costa, lo pudieron oir distintamente á 12 kilómetros de distancia. En este caso, la lluvia contuvo la evaporacion del mar, devolviendo á la atmósfera su homogeneidad.»

¿Las nieblas y las brumas espesas son obstáculos para la propagacion del sonido? ¿Disminuyen su alcance? Así se creia hasta ahora. Varios experimentos hechos por el mismo sabio parecen en contradiccion con esta opinion. En efecto, en los dias 10, 11 y 12 de diciembre, durante los cuales rodeó á Lóndres una niebla de espesor excepcional, se oyeron los disparos de cañon á mucha mayor distancia que en los dias despejados que precedieron á los brumosos ó que siguieron á la desaparicion completa de la niebla. Así pues, como nota Tyndall, la misma causa que disminuye la trasparencia óptica de las capas de aire aumenta su trasparencia acústica.

M. Felipe Breton, ingeniero en jefe de puentes y caminos, sin rechazar la explicacion de Humboldt y de Tyndall, cree que otra causa puede producir la brusca interrupcion de las señales sonoras. En una atmósfera perfectamente homogénea, pero cuyas capas estén á temperaturas diferentes y que varíen de continuo, las ondas sonoras emanadas de una señal situada á mayor ó menor altura van á rasar el horizonte, bien sea este un llano ó la superficie del mar, á cierta distancia. Allí se levantan bruscamente, dejando más léjos un espacio en el que no penetran y al cual da el citado ingeniero el nombre de *sombra del silencio*. Para percibir los sonidos en este espacio, seria preciso elevarse vertical-

mente á alturas que crecieran con la distancia. Así pues, pudo muy bien haber sucedido que el buque en que iba Tyndall al hacer sus experimentos hubiese penetrado en dicho espacio, y que el físico inglés atribuyera á falta de homogeneidad lo que era consecuencia de una ley geométrica de la propagacion de las ondas.

«Por ejemplo, dice Breton, si le sucedió al alejarse del instrumento ó aparato de señales que dejara de oir de pronto el sonido, en lugar de notar una aminoracion gradual y continua, debió consistir en que en el momento de la cesacion brusca de la audicion, atravesara el observador la superficie de la sombra acústica, penetrando de improviso en la sombra del silencio: lo repentino de la extincion aparente debió ser tanto más notable y claro cuanto más completa era la trasparencia acústica del aire.»

Sea lo que quiera de las varias teorías propuestas para explicar las anomalías que la observacion ha reconocido ya en el alcance variable de las señales sonoras, la necesidad de efectuar nuevos experimentos se desprende de los hechos que acabamos de mencionar. La importancia práctica de la cuestion no dejará, por otra parte, de excitar el interés y la solicitud de los físicos.

CAPÍTULO V

LAS VIBRACIONES SONORAS

I

VIBRACIONES DE LOS SÓLIDOS, DE LOS LÍQUIDOS Y DE LOS GASES

El sonido es un movimiento vibratorio.

Los cuerpos sonoros son cuerpos elásticos, cuyas moléculas ejecutan, mediante la percusion, el roce ú otros modos de conmocion, una serie de movimientos de vaiven alrededor de su posicion de equilibrio. Estas vibraciones se comunican sucesivamente á los medios circundantes, gaseosos, sólidos y líquidos, en todas direcciones, y van á parar al órgano del oído. Una vez en este, el movimiento vibratorio actúa en los nervios especiales de dicho órgano, y si la velocidad y amplitud de las vibraciones tienen valores convenientes, produce en el cerebro la sensacion del sonido.

Merced á algunos sencillos experimentos se hace evidente la existencia de las vibraciones sonoras.

Estas son desde luégo y con frecuencia perceptibles al simple tacto. Si con un pedazo de metal ó de madera se da un golpe en los brazos de unas tenazas de chimenea suspendidas, se percibe un sonido, y al aplicar los dedos á dichos brazos se nota una especie de temblor muy fácil de distinguir del movimiento de oscilacion visible. Lo propio sucede si se hace resonar una campana, un timbre ó un instrumento de música de suficiente volúmen ó si se ponen, por ejemplo, los dedos sobre la mesa armónica de un piano miéntras se toca este instrumento. Un tambor, una corneta que pasa por delante de una casa hace retemblar los cristales de las vidrieras, sucediendo lo propio, y á mucha mayor distancia, con la detonacion de un cañonazo. Si se le disparara muy cerca, el estampido romperia los cristales, pero en este caso el efecto producido se complica con el movimiento de trasporte de las capas aéreas y con el vacío causado en la atmósfera por la explosion.

Las vibraciones sonoras son visibles en muchos cuerpos, y especialmente en las cuerdas y varillas metálicas. Si se coge una cuerda de violin y se la pone bien tirante por sus dos extremos sobre una superficie de color oscuro,—condicion realizada en los instrumentos de cuerda,—y se produce entónces un sonido con un arco, ó pulsando la cuerda por su parte media, se verá cómo esta cuerda se dilata de los extremos al centro, presentando á la vista un ensanchamiento central aparente, originado por el rápido movimiento de vaiven que ejecuta (fig. 273). Vése la cuerda á la vez, por decirlo así, en sus posiciones extremas y medias, merced á la persistencia de las impresiones luminosas en la retina.

En vez de una cuerda, consideremos una

varilla metálica sujeta por uno de sus extremos (fig. 274). Si se la separa de su posicion de equilibrio, se la verá ejecutar una serie de oscilaciones cuya amplitud irá disminuyendo hasta anularse totalmente. Miéntras duran las vibraciones de la varilla se percibe un sonido que se debilita y se extingue á la par del movimiento. Los brazos de un diapason que se hace resonar oscilan visiblemente, de suerte que la vista no distingue con claridad sus contornos: el efecto de las vibraciones es el mismo que en el ejemplo de la cuerda sonora, y la vision confusa que de ellas resulta depende tambien de la duracion de la sensacion luminosa. El ojo ve simultáneamente cada rama ó brazo del instrumento en todas las posiciones que las vibraciones le hacen ocupar á uno y otro lado de su posicion de equilibrio.

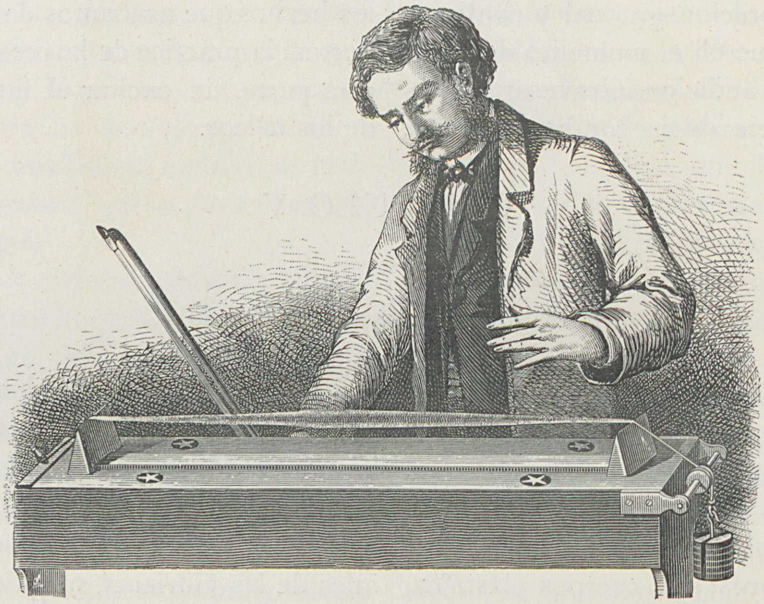


Fig. 273.—Vibraciones trasversales de una cuerda sonora

Una campana de cristal, un timbre metálico, cuyo borde se frota con un arco de violin, emiten sonidos con frecuencia muy enérgicos, siendo fáciles de comprobar las vibraciones que los engendran. Una varilla metálica cuya punta toca ligeramente el borde de una campana de cristal, repercute los golpes secos y repetidos que se descargan en esta, y el ruido que resulta se distingue claramente del sonido que produce el vaso (fig. 275). La bola de un péndulo puesta en contacto con el borde de la misma campana es despedida con fuerza y oscila miéntras dura el sonido. Del propio modo, una bolita metálica, puesta en el interior de un timbre, da pequeños saltos cuando este resuena (fig. 276), haciendo así patentes las vibraciones de que están animadas las moléculas de los cuerpos sonoros.

Además de las vibraciones cuya direccion es perpendicular á su longitud, y á las cuales se da por esta razon el nombre de *vibraciones trasversales*,—que son las de que acabamos de tratar,—las cuerdas, las varillas metálicas, las de madera, cristal ú otras sustancias elásticas, ejecutan tambien *vibraciones longitudinales*, que se pueden hacer perceptibles por medios parecidos á los que dejamos descritos. Tomemos por ejemplo una barrita de hierro ó un tubo de cristal, sujetando uno de sus extremos, y frotémoslo en el sentido de su longitud con un pedazo de lienzo untado de colofana: en este caso resultará un sonido. Si ponemos préviamente en contacto con el extremo libre de la barra ó del tubo una bolita que forme péndulo, se la verá lanzarse y oscilar en tanto que dure el sonido, efectuando su movimiento en la prolongacion del eje de la barra ó del tubo: será longitudinal, como las vibraciones que lo producen.

Con el instrumento de Trevelyan, del que hemos hablado anteriormente y con el cual se obtienen sonidos mediante el contacto de dos cuerpos sólidos de temperaturas desiguales, se pueden tambien hacer perceptibles á la vista

las vibraciones sonoras (fig. 277). Colocando de través en la caja metálica una barra terminada en dos bolas, el peso de esta barra hace las vibraciones más lentas, siendo fácil de observar el balanceo alternado que ejecutan la barra y las bolas. Tyndall ha ideado un medio muy ingenioso de hacer visibles estas vibraciones. Para ello fija en el centro de la cuna ó caja metálica un pequeño disco de plata bruñida, sobre el cual dirige un haz de luz eléctrica. La luz reflejada en este espejo va á caer en una pantalla, y tan luégo como el hierro caliente se halla en contacto con la masa fria del plomo, se ve cómo balancea ú oscila en la pantalla el reflejo de la luz.

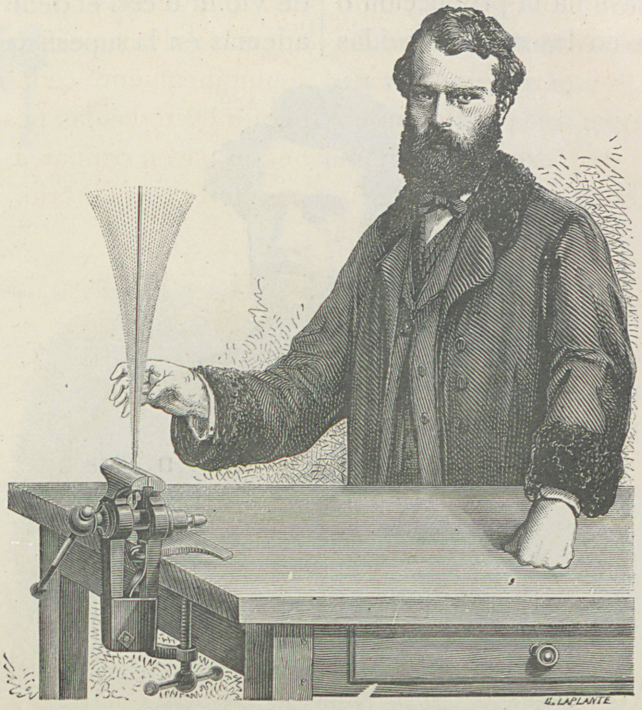


Fig. 274. — Vibraciones trasversales de una varilla metálica

Estudiando los efectos del calor se puede probar que la causa de las oscilaciones en el instrumento de Trevelyan está en la dilatacion momentánea del plomo en los puntos en que este metal se pone sucesivamente en contacto con el hierro caliente; esta dilatacion brusca da lugar á la formacion de burbujillas que nacen al contacto, y que desaparecen tan luégo como este último cesa y que hacen oscilar la caja metálica á derecha ó izquierda (fig. 278). De aquí resulta una serie de pequeños choques bastante repetidos para producir un sonido. Puede hacerse el experimento con una pala ó badila, calentando el mango y poniéndola en equilibrio sobre dos láminas de plomo sujetas en un torno de cerrajero.

Cuando describamos los medios empleados para medir el número de vibraciones tendremos ocasion de ver nuevas pruebas de la existencia de estos movimientos moleculares. En otra parte hemos dicho que cuando un cuerpo sólido produce un sonido, las más de las veces se hace ostensible el movimiento vibratorio por el estremecimiento que experimenta la mano al tacto.

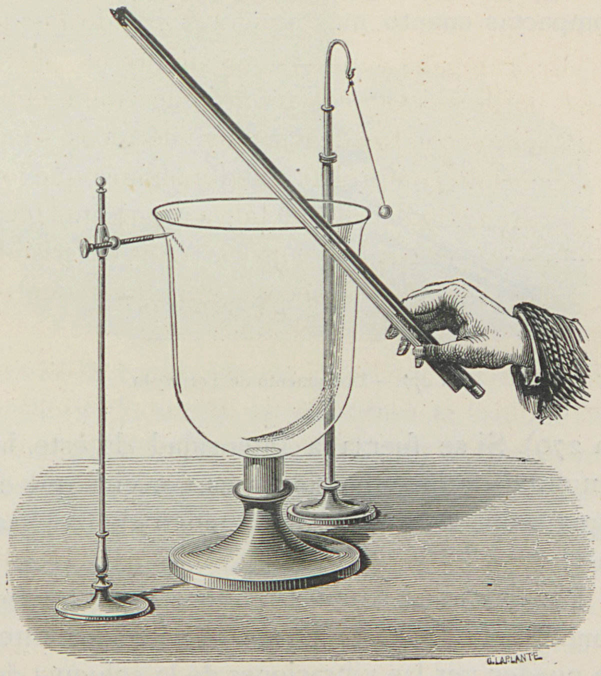


Fig. 275. — Vibraciones de una campana de cristal

Hasta aquí no hemos considerado más que las vibraciones de los cuerpos sólidos para ponerlas en evidencia. Pero tambien se puede hacer visibles las que ocasiona la produccion ó la trasmision del sonido en las masas líquidas y en los gases. Un vaso medio lleno de agua vibra como la campana de cristal de que hemos hablado, cuando se frotan sus bordes con un arco de violin ó con el dedo mojado. Entónces se ve además en la superficie líquida una multitud de



Fig. 276.—Vibraciones de un timbre sonoro

estrías que se dividen en cuatro y á veces en seis grupos principales y que son tanto más compactas cuanto más agudo el sonido (figu-

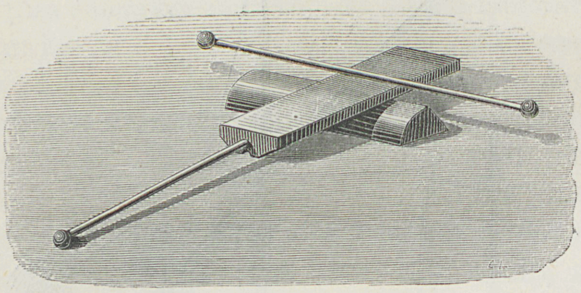


Fig. 277.—Instrumento de Trevelyan

ra 279). Si se fuerza la intensidad de este, la amplitud de las vibraciones es tan viva que el agua brota de cada grupo á modo de finísima lluvia.

Por último, si se adapta á un fuelle un tubo sonoro que tenga una de sus caras trasparente, se pueden ver las vibraciones de la columna de aire interior del modo siguiente: suspéndese del hilo un pequeño marco cubierto con una membrana estirada en el interior del tubo. Cuando este resuena, se ven los granos de arena, que se habian puesto préviamente en la membrana, saltando en la superficie de esta y probando así la existencia de las vibraciones de la columna gaseosa, trasmitidas á la membrana misma y á los granos mismos de que está espolvoreada (figura 280). Hemos visto que las vibraciones del aire tienen á veces gran energía, puesto que los vidrios retiemblan, y hasta se rompen cuando resuena cerca de ellos una vibracion algo fuerte, como la de un cañonazo.

Véase un hecho fundamental perfectamente demostrado por la experiencia. El sonido resulta de los movimientos vibratorios que ejecutan los cuerpos elásticos, sólidos, líquidos ó gaseosos, vibraciones que se trasmiten al órgano

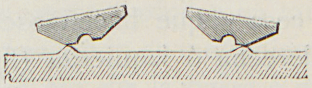


Fig. 278.—Oscilaciones de la cuna en el instrumento de Trevelyan

del oído por conducto de varios medios que lo separan del cuerpo sonoro. Compréndese pues por qué no se propaga el sonido en el vacío. El timbre golpeado por un martillo bajo el recipiente de la máquina neumática vibra á pesar de todo; pero sus vibraciones no se trasmiten

ya, ó á lo sumo se trasmiten imperfectamente por intermedio de la almohadilla que soporta el

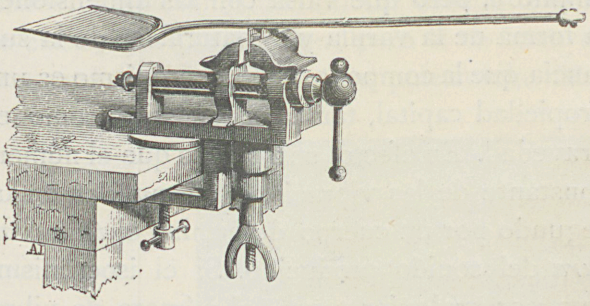


Fig. 279.—Experimento de Trevelyan simplificado por Tyndall

aparato y de la escasa cantidad de aire que queda siempre, áun en el vacío más completo que se pueda hacer.

II

VIBRACIONES PENDULARES

Los experimentos que acabamos de describir han patentizado que el sonido es efecto de un movimiento vibratorio de los cuerpos ó de los medios elásticos.

Vamos ahora á estudiar más íntimamente la naturaleza de este movimiento, y las formas que presenta, segun que se efectúe en un medio sólido, en un líquido ó en una masa gaseosa. Este estudio es objeto de una rama de la ciencia, muy elevada, muy delicada y difícil, por lo cual procuraremos limitarnos á dar una idea de



Fig. 280.—Vibraciones de las moléculas líquidas á causa de una conmocion sonora

los hechos experimentales y de los principios en que descansa.

Consideremos ante todo el movimiento en los cuerpos elásticos.

Figurémonos una varilla ó lámina tenue de metal, sujeta por uno de sus extremos. Separándola de su posicion de equilibrio, lo cual convierte en línea curva la recta que formaba, y abandonándola en seguida á sí misma, ejecutará una serie de oscilaciones que producirán un sonido cuyo tono é intensidad dependerán del número de aquellas y de su amplitud. ¿Cómo se efectúan estas oscilaciones ó vibraciones?

En el momento en que la mano que ha separado la varilla de su posicion rectilínea de equilibrio, la suelta, la velocidad de cualquiera de sus puntos, por ejemplo de su extremo, es nula (fig. 282); esta velocidad irá luégo aumentando hasta que la varilla vuelva á su posicion vertical, esto es, á su punto de partida, en el cual llega á su máximum, y por lo tanto es capaz de hacer que la varilla pase más allá de esta posicion, sólo que, como entónces se ejerce la fuerza de elasticidad en sentido contrario, propenderá á hacer que disminuya la velocidad adquirida. La disminuye en efecto hasta anularla, lo cual sucede cuando la varilla se ha desviado á la izquierda una cantidad precisamente igual á

aquella en que se habia desviado á la derecha, ó sea en su orígen. Emprenderá pues un movimiento en sentido opuesto, pero esta segunda excursion será en todo simétrica á la primera, de suerte que la varilla volverá á su posicion

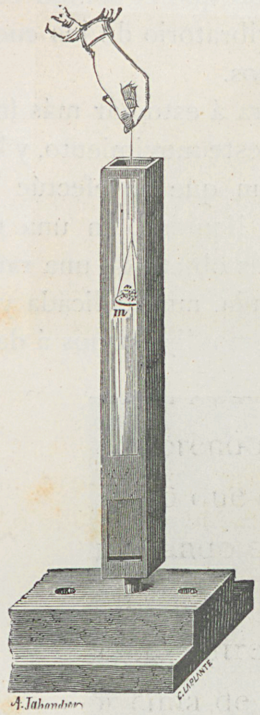


Fig. 281. —Vibraciones de la columna gaseosa de un tubo sonoro

de equilibrio y se apartará de ella á la derecha, y así sucesiva é indefinidamente. Síguese de aquí que si no hubiera ninguna resistencia, ninguna causa de perturbacion, el movimiento oscilatorio duraria indefinidamente. El frotamiento, la resistencia del aire obran tambien para destruirlo y disminuyen á cada período la amplitud de la oscilacion que acaba por ser nula, recobrando entónces la varilla elástica su posicion de equilibrio y quedando en reposo.

Vése que el movimiento vibratorio debido á la elasticidad es semejante por todos conceptos, excepto por lo que se refiere á la velocidad, al movimiento de un péndulo que oscila bajo la accion de la gravedad. Por esto se caracteriza con el nombre de *vibracion pendular* (fig. 282) la forma de vibracion que resulta (1). En este ejemplo, como en el del péndulo, las oscilaciones tienen una duracion independiente de la amplitud, pero que varía con las dimensiones, la forma de la varilla y la naturaleza de la sustancia que la compone. Este isocronismo es una propiedad capital, tanto en acústica como en gravedad. En efecto, se ha visto que el número constante de las vibraciones ejecutadas en un segundo por un cuerpo determina el *tono* ó *altura* del sonido producido. Si el isocronismo cesa por cualquier causa, el número de vibraciones disminuirá ó aumentará, y el sonido será más grave ó más agudo.

Hemos presentado un ejemplo particular: el de una varilla rígida sujeta por uno de sus extremos, y hemos supuesto que desarrollábamos su elasticidad, ejerciendo cierta flexion en uno de sus puntos. Pero, cualquiera que sea el modo de accion, la forma del movimiento vibratorio es esencialmente la misma, siempre que el sonido musical sea un sonido simple, es decir, no vaya acompañado de sonidos parciales. En el caso de que el sonido fundamental vaya acompañado de esta clase de sonidos llamados *armónicos*, y de los cuales nos ocuparemos más adelante, la forma de la vibracion no será ya la

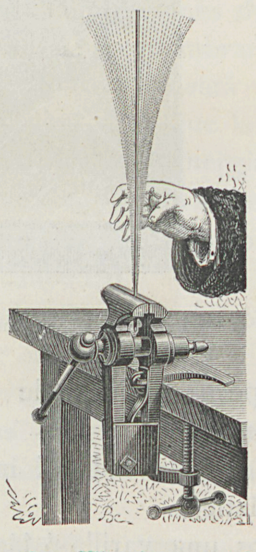


Fig. 282. —Vibraciones pendulares

de una vibracion pendular, sino la resultante de las vibraciones pendulares correspondientes á cada uno de los sonidos componentes (2).

(1) Dase el nombre de *oscilacion* ó *vibracion*, ya al período de movimiento comprendido entre la posicion de equilibrio y el primer regreso á esta posicion, ó ya al doble período comprendido entre dos regresos consecutivos de la varilla á la misma fase del movimiento. Los franceses distinguen estos períodos dando al primero el nombre de *vibracion simple* y al segundo el de *vibracion doble*, conforme al uso adoptado para los movimientos del péndulo. Los alemanes llaman *vibracion* á lo que los franceses *vibracion doble*, resultando que el número de vibraciones es para los primeros la mitad menor que para los segundos.

(2) El ilustre geómetra Fourier ha demostrado la siguiente ley matemática: *Toda forma de vibracion, regular y periódica, puede considerarse como la suma de vibraciones pendulares cuyas duraciones son una, dos, tres ó más veces menores que la del movimiento dado.* Aplicando Helmholtz la ley de Fourier á la acústica, ha traducido así su fórmula: *Todo movimiento vibratorio del aire en el conducto auditivo,*

Si hubiésemos considerado una cuerda tirante, en lugar de tener un cuerpo elástico por sí mismo, hubiéramos tenido un cuerpo dotado de elasticidad por tension; pero si se hace vibrar esta cuerda por flexion, pulsándola, dándole un golpe ó frotándola con un arco de violin, no por eso dejará de describir cada uno de sus puntos la misma clase de movimiento: sus vibraciones, simples ó compuestas, serán siempre análogas á las del péndulo. Por último, en vez

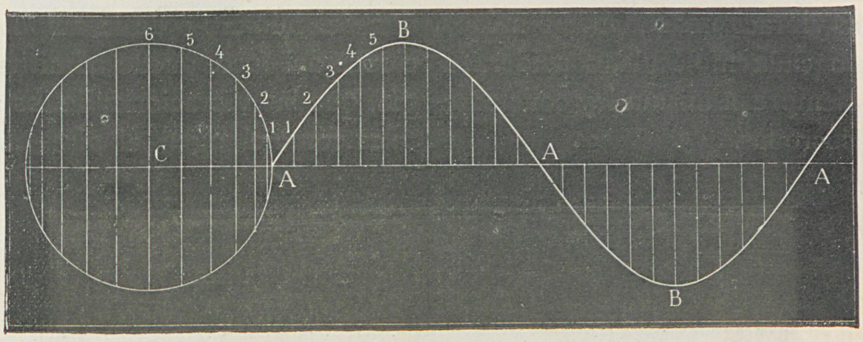


Fig. 283.—Forma de una vibracion pendular simple

de mover el cuerpo elástico en direccion perpendicular á su longitud, produciendo así las vibraciones *trasversales*, se le podria imprimir un movimiento en el sentido de esta longitud, y así por ejemplo, una barra metálica por la cual se pase el dedo mojado ó un pedazo de

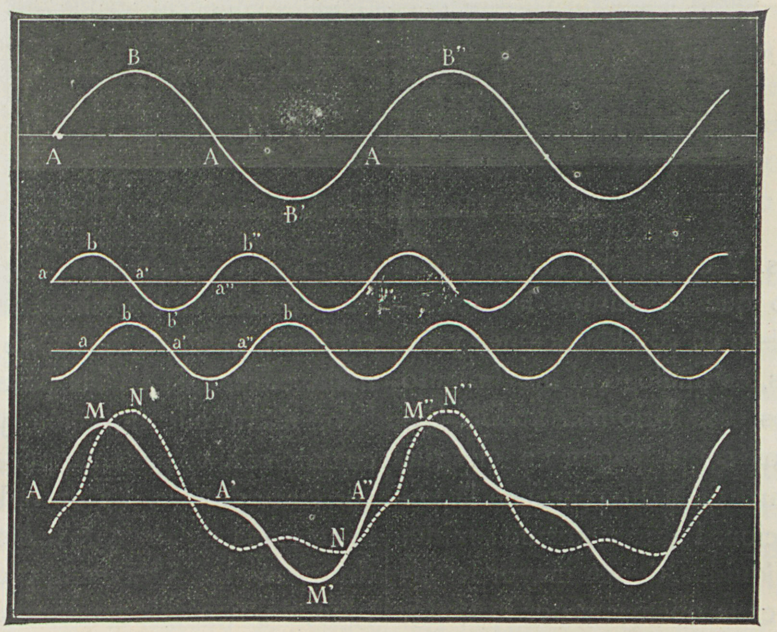


Fig. 284.—Vibraciones compuestas

paño espolvoreado de colofana, experimenta entónces en su longitud contracciones y dilataciones periódicas de las que resulta un sonido, y en este caso las vibraciones son longitudinales. Pero el movimiento elemental de cada una de estas moléculas puede descomponerse siempre en las mismas fases que hemos analizado anteriormente; siempre es un movimiento análogo al del péndulo, y las vibraciones compuestas, vibraciones pendulares.

Una campanilla ó un timbre, una membrana tirante, una placa sonora, etc., en una palabra, un sólido elástico susceptible de emitir sonidos por percusion, frotamiento, etc., vibra siempre del mismo modo; sólo que, segun veremos des-

correspondiente á un sonido musical, puede considerarse siempre, y siempre tambien de un solo modo, como la suma de cierto número de movimientos vibratorios pendulares, correspondiente á los sonidos elementales considerados.

Más adelante veremos que el *timbre*, ó sea la tercera cualidad del sonido musical, depende de la presencia y del predominio de tales ó cuales sonidos armónicos en el sonido fundamental. El timbre está, pues, íntimamente unido á la forma de la vibracion, al paso que el tono depende de su duracion y la intensidad de su amplitud.

pues, miéntras unas partes del cuerpo vibran, otras continúan en reposo; hay regiones en que el movimiento vibratorio llega al máximum de amplitud, y otras en que es nulo; es decir, que el cuerpo sonoro se divide en *vientres* y *nudos*, que varian con arreglo á ciertas circunstancias. Las leyes de estas vibraciones son más ó ménos complicadas; pero cada molécula, considerada de por sí, sigue siempre la misma ley constante de oscilaciones isócronas.

Como, despues de todo, los sonidos producidos por los cuerpos sólidos vibrantes no son perceptibles sino en tanto que sus vibraciones se comunican al oído por un medio flúido, líquido ó gaseoso, y como, segun la experiencia nos lo enseña, las cualidades del sonido dependen del número ó de la amplitud de las vibraciones del foco, puede admitirse ya por analogía, que las vibraciones de los medios elásticos tales como el agua, el aire, etc., son idénticas

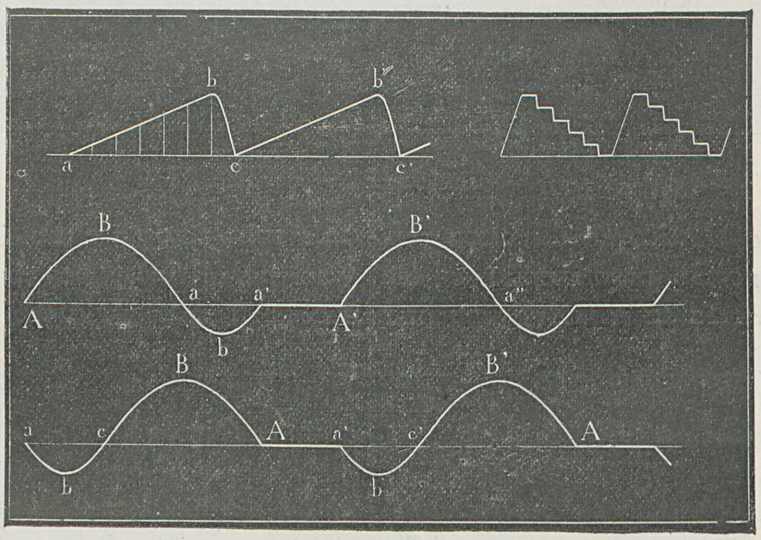


Fig. 285.—Vibraciones periódicas discontinuas

á las de los sólidos. Y en efecto, hemos visto que el movimiento que constituye las ondas aéreas, el cual consiste en condensaciones y dilataciones sucesivas, es análogo al movimiento pendular que hemos estudiado más arriba. Sábese que los sonidos se propagan en el agua como en el aire, aparte de la diferencia en la velocidad de propagacion. Para un mismo sonido, las ondas sonoras líquidas tienen mayor longitud, pero su forma es la misma; y por lo tanto, no hay nada que cambiar en la explicacion dada con respecto á las ondas aéreas.

III

VIBRACIONES DE LAS MASAS FLÚIDAS

Réstanos decir cómo ocurren las cosas cuando el sonido, en vez de propagarse simplemente por los líquidos y los gases, como sucede cuando el cuerpo sonoro es un líquido elástico, tiene orígen en el flúido mismo. Pero ántes describamos el fenómeno.

Para ello nos limitaremos á recordar, puesto que los describiremos más ampliamente, los que ocurren en los tubos sonoros. En estos, una columna gaseosa, aérea, de longitud determinada, encerrada en las paredes de un tubo sólido, entra en vibracion y produce sonidos cuando se hace penetrar por su boca una rápida corriente de aire. La entrada en vibracion de la columna de aire puede efectuarse de dos distintos modos. Ora está provista la boca del tubo de una lámina elástica, tenue y flexible (*lengüeta* batiente ó libre), que entra en vibracion á impulso de la corriente de aire, resultando de aquí un paso periódico de este flúido, que engendra el sonido; ora la boca del tubo está cortada en bisel, y divide la corriente que penetra por ella, dando lugar á compresiones y dilataciones alternadas, á vibraciones que se comunican á la columna de aire del tubo y la hacen vibrar á su vez. La vibracion de las boquillas de los instrumentos de música que, como la trompa, son tubos terminados por una embocadura hemisférica ó cónica, conmueve la columna de aire haciéndola vibrar al unísono.

Por último, los tubos vibran tambien del mismo modo y producen sonidos cuando se les sumerge en el agua y llega una corriente líquida por la boca del tubo.

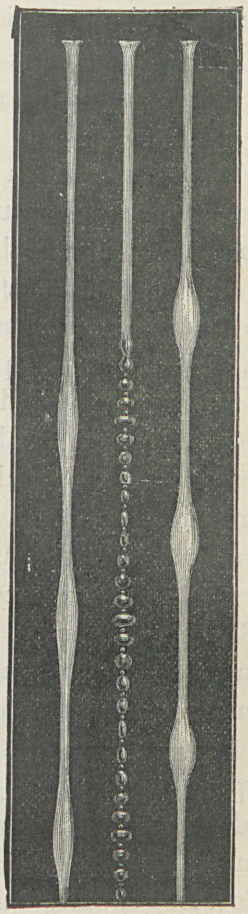


Fig. 286.—Constitucion de una vena ó chorro líquido

En todos estos fenómenos, en que las vibraciones de las masas flúidas producen los sonidos, hay una circunstancia comun, y es la salida de una vena líquida ó gaseosa por un orificio. Era por tanto interesante estudiar el modo cómo se forman estas vibraciones cuando se reduce el hecho á su forma más sencilla. Así lo ha hecho Savart en una serie de experimentos sobre la salida de las venas líquidas que se escapan por un orificio abierto en una pared delgada bajo la influencia de una presion más ó ménos grande. El sabio acústico ha logrado comprobar así muchos y muy curiosos fenómenos que esclarecen sobremanera el asunto, ántes bastante oscuro, de la generacion de los movimientos vibratorios en el seno de los líquidos y de los gases. Para dar una idea de sus investigaciones, lo mejor será trascribir el resúmen de que han sido objeto en una conferencia dada en 1869 por M. Maurat, en la «Sociedad de los amigos de las ciencias.»

«Empecemos, dice, por recordar cuál es, en concepto de Savart, la constitucion de una vena líquida vertical que sale por un orificio practicado en una pared delgada. La parte más inmediata al orificio es límpida y trasparente; parece (al ménos cuando no se la examina con precauciones particulares) inmóvil como una varilla de cristal. Tras ella se ve una segunda parte enturbiada y con dilataciones y reducciones alternadas, cuya posicion es casi constante, áun cuando son producidas por porciones de líquido que se renuevan continuamente. Este aspecto de la vena está reproducido fielmente en el primer dibujo de la izquierda de la figura 286.

»Hagamos constar desde luégo que la segunda parte de la vena debe su apariencia á su discontinuidad. Y en efecto, está formada de gotas separadas, las cuales dejan además entre sí intervalos bastante grandes proporcionalmente á su diámetro. Para cerciorarse de ello, se puede pasar con rapidez el dedo por la parte turbia, y á menudo sucede que no se moja. Tambien es posible, despues de colorar bastante el líquido con una infusion de añil, tender detrás de la vena en sentido vertical un hilo suficientemente iluminado. Este hilo quedará oculto por la primera parte de la vena que es continua, pero se le verá con facilidad al través de la segunda. El experimento será más concluyente si se emplea un líquido enteramente opaco, como el mercurio. Por último, basta observar los movimientos de las gotas, mirando la vena de arriba abajo, para verlas perfectamente distintas (fig. 286, segundo dibujo). ¿Cuál puede ser la causa de tan notable fenómeno?»

M. Maurat recuerda á continuacion los experimentos de Plateau sobre las figuras de equilibrio de las masas líquidas, cuando están sometidas únicamente á las acciones mutuas de las moléculas. Estas figuras son la esfera, el cilindro y el plano. El equilibrio de un cilindro es inestable cuando la altura excede del triple del diámetro; entónces la forma cilíndrica se destruye, y el cilindro se resuelve en gruesas esferas separadas por esferillas de dimensiones mucho más reducidas.

«Ahora bien, continúa, una vena no es otra cosa sino un cilindro líquido en movimiento en

el sentido de su eje. La desigual velocidad de sus diferentes partes, que propenden sin cesar á disminuir de diámetro, puede modificar el fenómeno, pero no cambiar su naturaleza, porque esta desigualdad es muy insignificante si las moléculas están poco distantes. Así pues, á partir de un punto muy inmediato al orificio, la vena líquida debe empezar á sufrir la misma trasformacion que el cilindro de Plateau, siendo la rapidez del movimiento lo único que nos oculta las dilataciones y reducciones que en ella sobrevienen, y que ha comprobado Savart. La parte turbia no empieza hasta el momento en que se ha establecido la discontinuidad, es decir, cuando la trasformacion es completa. Pues bien, puesto que su duracion es proporcional al diámetro, y la velocidad de salida es á su vez proporcional á la raíz cuadrada de la carga, la longitud de la parte límpida de una vena deberá ser tambien proporcional á estas dos cantidades, como así resulta en efecto de las medidas de Savart.»

Así pues, el aspecto que presenta á la vista el chorro ó desagüe de una vena líquida se explica por la formacion de gotitas, unas relativamente mayores que otras.

«Hablemos ante todo de las gotas gruesas. Sus diferentes moléculas no están animadas exactamente de la misma velocidad, por cuanto pertenecen á puntos de la vena situados á distancias desiguales del orificio. Estas diferencias de velocidad tienen indudablemente por efecto el deformarlas, y como siempre propenden á volver al estado esférico, ejecutarán vibraciones que tan pronto les darán la apariencia de elipsoides prolongados en sentido vertical como aplanados en el mismo sentido. En su consecuencia, la vena presentará en su parte turbia henchimientos correspondientes á las gotas que se hallan en el primer caso y estrangulaciones ó reducciones correspondientes á las que están en el segundo, y siendo las vibraciones sensiblemente isócronas, las distancias de un vientre al siguiente deberian crecer como los espacios que recorre un cuerpo pesado en los segundos sucesivos de su caida, es decir, como la série de los números impares (1).

»Veamos ahora cuál debe ser el efecto en el medio ambiente de la vena constituida como acabamos de explicar. La sucesion regular de las gotas en un punto determinado comunica forzosamente al aire impulsos periódicos iguales, capaces de producir un sonido si son bastante rápidos. Así lo demuestra la experiencia en la mayoría de casos; verdad es que el sonido suele ser muy débil, y que para oirlo hay que aplicar el oído muy cerca de la vena; pero se puede conseguir que sea más intenso. Para ello se escogerá un orificio circular bastante ancho para que las gotas sean más gruesas; se hará salir el líquido bien verticalmente y con suficiente presion, para que los empujes sean más fuertes, y por último, convendrá atenuar en lo posible el ruido de la caida en el depósito inferior.» Entónces resulta un sonido musical: tan luégo como empieza, se observa un cambio notable en la vena, cuya parte líquida se reduce y cuyos vientres y nodos se hacen más marcados (figura 286, tercer dibujo). Debe notarse que se observa este mismo cambio cuando se produce un sonido del mismo tono cerca de la vena líquida.

Vése pues que el desagüe de los líquidos va acompañado de movimientos vibratorios que pueden ser bastante rápidos é intensos para producir sonidos. Los experimentos de M. Masson prueban que ocurren fenómenos muy semejantes en la salida de las venas gaseosas. «Este físico, sigue diciendo M. Maurat, ha demostrado que resultan sonidos cuando se hace salir por orificios circulares adecuados el aire comprimido en un gran cajon por medio de un fuelle. El ruido que se oye es análogo á un silbido y está formado por una mezcla muy compleja de sonidos que difieren á la vez en tono é intensidad. Si se rodea la vena gaseosa producida de este modo de un tubo cilíndrico cuyo eje ocupe aquella, la columna de aire de este tubo recibirá la conmocion de los movimientos vibratorios de la vena que pueda refor-

1) Si las gotas no son visibles, consiste en la persistencia de las mpresiones luminosas en la retina que hace que cada gota aparezca á a vez en todas las posiciones sucesivas y con todas las formas que adquiere. Este efecto desaparece cuando se aparta la vista verticalmente siguiendo el movimiento del líquido; entónces la imágen de la gota movible queda fija en el mismo punto de la retina, y parece aislada y la gota en reposo como lo está en realidad. Haciendo el experimento en la oscuridad, y alumbrando luégo la vena con una chispa eléctrica, la duracion sobremanera rápida de la iluminacion permite ver la columna líquida en su forma verdadera, del propio modo que á la luz de un relámpago parecen inmóviles los rayos de una rueda animada del movimiento más rápido.

zar, y se oirá un sonido musical muy puro y fácil de discernir. El aparato será un verdadero tubo ó cañon de órgano.»

Más adelante describiremos otros fenómenos que tienen gran analogía con los anteriores: nos referimos á los sonidos producidos por llamas incandescentes, que han recibido los nombres de *llamas sonoras* y *llamas cantantes* ó *sensibles*.

IV

ONDAS SONORAS AÉREAS

Acabamos de ver cómo se pueden hacer perceptibles las vibraciones de los cuerpos sonoros: en breve diremos cómo se llega á contar su número y á comprobar prácticamente las leyes de sus variaciones en los sólidos de varias formas y en las columnas gaseosas, cilíndricas

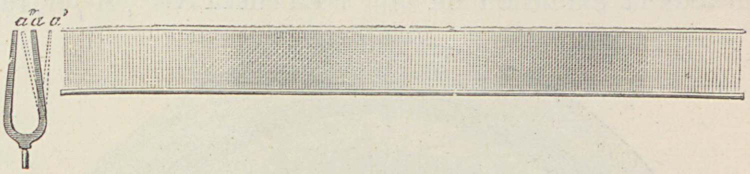


Fig. 287. — Condensaciones y dilataciones que constituyen la onda sonora aérea

ó prismáticas. Pero, cuando un cuerpo resuena, las vibraciones que ejecuta no llegan á nuestro oído de modo que nos produzcan la sensacion de un sonido, sino agitando progresivamente la masa de aire interpuesta entre el centro de conmocion y nuestros órganos. A falta de este vehículo, el sonido no se percibe, ó por lo ménos llega muy débil á nosotros, despues de propagarse por los cuerpos sólidos que establecen una conmocion indirecta entre el cuerpo y el oído. El aire entra pues á su vez en vibracion por el impulso de los movimientos que efectúan las moléculas del cuerpo sonoro. Sus capas pasan por condensaciones y dilataciones sucesivas que se propagan con velocidad constante, cuando la densidad y la temperatura subsisten, ó, si se quiere, cuando la homogeneidad de la mezcla gaseosa es perfecta. Procuraremos hacer comprender cómo se suceden las ondas sonoras en el aire ó en cualquier otro gas, y cómo se ha podido medir su longitud.

Supongamos que se pone el brazo de un dia-

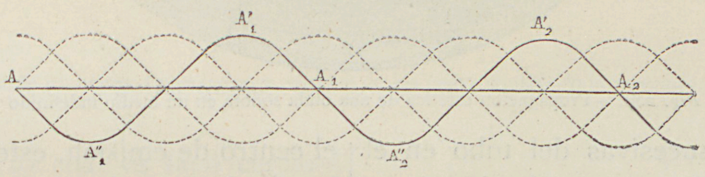


Fig. 288. — Representacion gráfica de las fases de una onda sonora

pason delante de un tubo prismático y que se le hace vibrar. Las vibraciones se propagarán por la columna de aire del tubo. Veamos lo que ocurre en las capas gaseosas cuando la lámina metálica ejecuta una vibracion entera, es decir, cuando se separa de su posicion *a*'' para ir á *a*' y volver en seguida á *a*'', pasando cada vez por su posicion media *a* (fig. 287). Este movimiento de vaiven es análogo al del péndulo, de suerte que la velocidad de la lámina es alternativamente creciente y decreciente, segun que se acerca á la posicion *a* ó se aleja de ella. Durante el movimiento de *a*'' á *a*', las capas de aire del tubo reciben los impulsos de la lámina y experimentan por tanto condensaciones sucesivas y desiguales que se trasmitirán de una á otra, sin que por esto haya trasporte de moléculas. Estas condensaciones, al principio crecientes, llegarán á un máximum, á partir del cual disminuirán hasta que la lámina ó brazo vibrante del diapason vuelva á la posicion *a*'.

Al volver la lámina metálica de *a*' á *a*'', las mismas secciones gaseosas, vueltas á su densidad normal, se dilatarán al contrario en virtud de su elasticidad, para llenar el vacío dejado delante de la columna de aire por la segunda excursion de la lámina vibrante. Resultará la misma propagacion de las dilataciones en las capas gaseosas, cada una de las cuales oscilará á cada lado de su posicion de equilibrio, trasmitiendo á la capa siguiente los movimientos sucesivos de que á su vez está animada.

A cada vibracion completa del brazo del diapason corresponde pues una serie de condensaciones, ó sea la *semi-onda condensada;* luégo una serie de dilataciones, la *semi-onda dilatada.* Su conjunto forma una onda sonora completa que recorre toda la extension del tubo y que, como se ve, es resultado de una doble vibracion de la lámina elástica.

Para representar gráficamente el estado de la columna de aire en toda la extension de la onda sonora, conviene figurar los diferentes grados de condensacion por medio de perpendiculares situadas por encima de la direccion de la onda, y por medio de otras trazadas debajo de esta direccion, las dilataciones que siguen (fig. 288); una y otra línea son de longitud nula cuando la densidad es la normal; sus longitudes máxima corresponden á las condensaciones y dilataciones máxima.

La curva AA''_1 A'_1 A_1 representa entónces el estado de las capas sucesivas del tubo en el momento en que la lámina metálica ha ejecutado una vibracion; la recta AA_1 es el camino recorrido durante este tiempo, es decir, la longitud de la onda sonora.

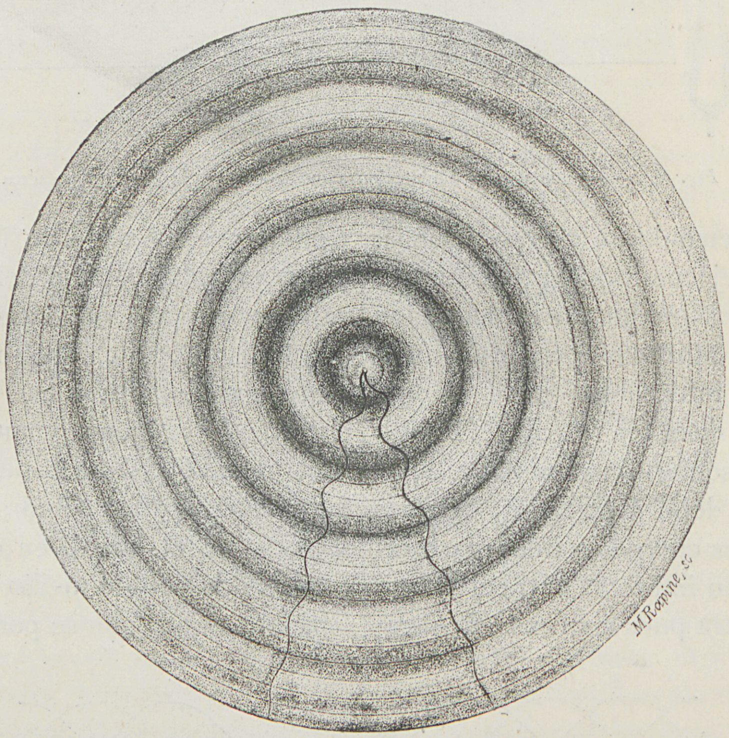


Fig. 289.—Propagacion esférica de una onda sonora en un medio indefinido

El espacio recorrido por esta onda será doble, triple, etc., despues de las dos, tres, etc., primeras vibraciones.

Ahora ya es fácil de comprender cómo se ha podido calcular la longitud de onda de un sonido de tono determinado. Sea, por ejemplo, uno que ejecute 450 vibraciones por segundo. Siendo en el mismo espacio de tiempo de 340 metros la velocidad de propagacion, á la temperatura de 15°,—si tal es en este momento la temperatura del aire,—claro está que en el momento en que el sonido llegue á dicha distancia de 340 metros, ha habido en el aire tantas ondas sucesivas como vibraciones completas desde el centro de emision, esto es, 450. Así pues, la longitud de cada una de ellas será la 450.ª parte del espacio recorrido, es decir, de 340 metros; la longitud de onda será en este caso de $0^m,755$.

Si pasamos ahora del caso en que el sonido se propaga por una columna prismática, á aquel en que la propagacion se efectúa en todos sentidos alrededor de un punto, las condensaciones y dilataciones sucesivas de las capas de aire se distribuirán á distancias iguales del centro de emision. Las ondas serán esféricas, sin que cambien su velocidad de propagacion ni su longitud; tan sólo disminuirá la amplitud, y por lo tanto la intensidad del sonido, como lo hemos observado ya. La figura 289 da idea del modo cómo se distribuyen las ondas sonoras en torno del centro de emision. Vése en ella la serie de las semi-ondas condensadas y dilatadas, mos-

trando las curvas onduladas que parten del centro que las condensaciones y dilataciones pierden de su amplitud conforme crece la distancia; la degradacion de la tinta tiene por objeto indicar el mismo decrecimiento de amplitud.

Para comprender cómo se propagan las ondas sin que haya trasporte de moléculas se suele comparar las ondas sonoras con el movimiento de una cuerda á la cual se imprime una brusca sacudida. Las ondulaciones recorren la cuerda de un extremo á otro; si esta está sujeta por uno de ellos, la onda retrocede. En uno y otro caso se trasmite el movimiento sin que haya verdadero cambio en la distancia de las moléculas al punto del que parte el impulso. Del propio modo, si se echa una piedra al agua, la conmocion producida en la masa líquida se trasmite con arreglo á una serie de ondas concéntricas que se van extinguiendo con la distancia, pero sin que haya verdadero arrastre de las

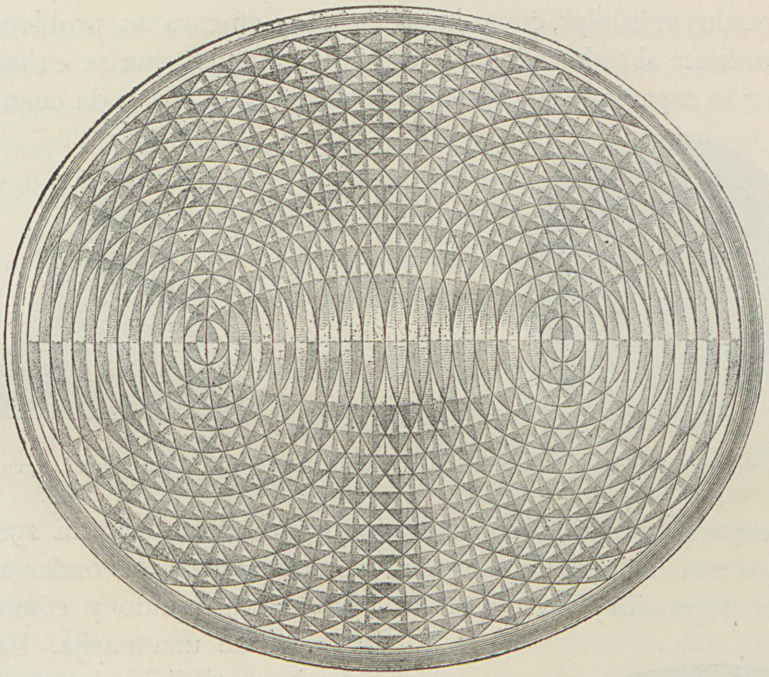


Fig. 290. — Coexistencia de las ondas. Propagacion y reflexion de las ondas líquidas en la superficie de un baño de azogue

moléculas líquidas, de lo cual es fácil cerciorarse observando la posicion fija que conservan los cuerpecillos que flotan en la superficie. Con todo, en ambos ejemplos, que por lo demás son muy á propósito para dar una idea de la propagacion de las ondas sonoras, hay una diferencia esencial que no debe olvidarse. Las condensaciones y dilataciones del aire motivadas por las vibraciones de los cuerpos sonoros, se efectúan en el mismo sentido del movimiento de propagacion, y paralelamente á la direccion de cada rayo sonoro, al paso que las ondulaciones de la cuerda, ó las de la superficie del agua se verifican en sentido perpendicular al movimiento de propagacion. Luégo veremos que sucede precisamente lo mismo con las ondas que caminan por un medio llamado éter y que tienen por orígen las vibraciones de los focos luminosos.

V

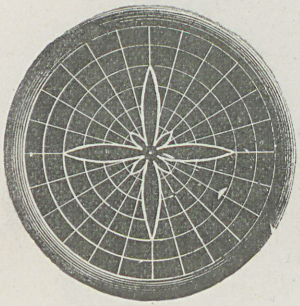
SUPERPOSICION DE LAS ONDAS SONORAS

Todo esto nos explica perfectamente la trasmision de un sólo sonido que el aire trasporta, por decirlo así, á nuestro oído. Pero si el aire es el vehículo de las vibraciones sonoras, ¿en qué consiste que propaga, sin perturbarlas, las de muchos sonidos simultáneos? Asistimos á un concierto, en donde muchos instrumentos emiten á cada instante sones que difieren de intensidad, tono y timbre. Los centros de emision están distribuidos de distintos modos en la sala: ¿cómo es que la masa de aire encerrada en la estancia trasmite á la vez tantas vibraciones, sin que haya completa cacofonía?

Supongamos tambien que está amaneciendo, y que cae una lluvia menuda y compacta cuyas gotitas, al llegar al suelo, producen una porcion

de ruidos leves, pero muy perceptibles; los cantos de las aves, despiertas á la llegada de la primavera, resuenan en los aires y parecen atravesar la ligera niebla que la lluvia extiende por el horizonte. Sobre aquellos gorjeos y aquellas voces, descuellan los cantos de los gallos, los ladridos de los perros, los saltos de los carros sobre el empedrado, las campanadas de las torres, y algunas que otras voces humanas, todo lo cual canta, grita, chilla, habla y resuena á la vez, sin que tan diversos sones se confundan en el oído. Estos sonidos múltiples, cuya simultaneidad seria discordante si todos ellos se produjeren en un reducido espacio, y sus resonancias aumentasen su confusion, se esparcen por la vasta extension de las capas de aire que pesan sobre la llanura, fundiéndose así en agradable armonía. Y aquí se nos ocurre de nuevo la misma pregunta. ¿Cómo puede el aire trasmitir á la vez y distintamente tantas ondulaciones emanadas de distintos centros, tantas vibraciones que no son isócronas? ¿Cómo pueden coexistir la intensidad, el tono y el timbre de cada sonido, en ese medio elástico y movible, sin sufrir alteracion?

Hay en esto un problema cuyos datos son tan complejos que se eximen del análisis. Sin embargo, la teoría da cuenta de estos fenómenos cuya explicacion parece tan difícil á primera vista, justificando sus conclusiones algunas teorías sencillas. Daniel Bernouilli y Eulero, sabios geómetras del siglo pasado, han demostrado el principio de la *coexistencia de pequeños movimientos, de tenues oscilaciones* en un mismo medio. Esto en cuanto á la teoría.



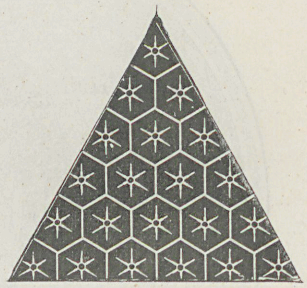


Fig. 291.—Vibraciones del azogue en la superficie de una vasija circular y de otra triangular (segun M. Barthélemy)

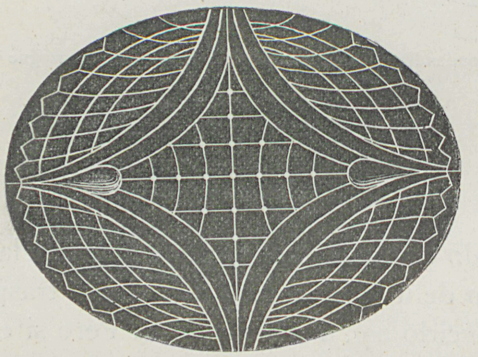


Fig. 292.—Vibraciones del azogue en la superficie de una vasija de forma elíptica

Ahora, echemos al agua, en puntos inmediatos, dos ó más piedras, y veremos los círculos concéntricos producidos por ellas, cruzándose sin destruirse, sobre todo si su amplitud no es muy grande. La figura 290 muestra á la vez cómo se cruzan las ondas sonoras en la superficie de un líquido y cómo se reflejan en las paredes de una vasija. La forma de esta es elíptica; está llena de mercurio, y las ondas que se ven en su superficie son las que ha producido la caida de una gotita de dicho líquido en uno de los focos de la elipse; de aquí resultan ondas circulares concéntricas en este foco, todas las cuales convergen en el segundo foco de la curva. Otro tanto sucederia si cayeran dos gotitas á la vez en cada foco (1).

Así pues, este ingenioso experimento demuestra, por una parte, la existencia de las ondas simultáneas, y por otra, la ley de su reflexion. Haciendo la restriccion de que hemos hablado anteriormente sobre la direccion de las ondas sonoras, da una idea bastante exacta de la reflexion de los sonidos y de su propagacion simultánea en el aire.

(1) M. Barthélemy, profesor de física en el liceo de Toulouse, ha hecho interesantes experimentos sobre la forma de las vibraciones comunicadas por un foco sonoro á los líquidos contenidos en vasijas de forma determinada. Los grabados 291 y 292 representan dos de las figuras obtenidas por dicho profesor.

CAPÍTULO VI

LAS VIBRACIONES SONORAS

I

EL TONO Ó ALTURA DE LOS SONIDOS ESTÁ EN RAZON DEL NÚMERO DE VIBRACIONES SONORAS

Si se comparan entre sí las sensaciones que las vibraciones de los cuerpos sonoros producen en el órgano del oído, se verá que se distinguen por varios caractéres que hemos tenido ya ocasion de indicar, y que son el *tono*, la *intensidad* y el *timbre*.

Hay sin embargo sonidos cuyo tono no es posible apreciar, comprendiéndoseles con el nombre de *ruidos*, por oposicion á los *sonidos musicales*, cuya definicion consiste precisamente en que son sonidos comparables entre sí por lo que respecta al tono. Ocupémonos ante todo de los sonidos musicales, y veamos á qué causa física deben su orígen.

Todos sabemos distinguir los sonidos agudos de los graves, cualquiera que sea el cuerpo sonoro que los produzca. Dícese de dos sonidos del mismo tono que están al *unísono*. Por lo regular, los oídos ménos ejercitados reconocen el unísono, y saben apreciar cuál de dos sonidos próximos á él es el más alto. Lo que tenemos que estudiar ahora es la causa física de estas diferencias, muy sencilla por cierto, y que consiste en lo siguiente:

La altura ó tonalidad de un sonido depende únicamente del mayor ó menor número de vibraciones ejecutadas á la vez por el cuerpo sonoro y por los medios en los cuales se propaga el sonido; miéntras mayor sea el número de vibraciones, más agudo es el sonido, y cuanto menor el número de aquellas, más grave será este. Veamos por medio de qué experimentos han llegado los físicos á comprobar esta importante ley, y cómo han procedido para contar estos movimientos que la vista ó los demás sentidos sólo pueden percibir muy confusamente.

Con la *rueda dentada*, ideada por Savart (fig. 293) se puede contar el número de vibraciones que corresponde á un sonido dado. En este aparato se produce el sonido mediante el choque de un naipe contra los dientes de una rueda que se hace girar con un manubrio. Cuando la velocidad de esta es pequeña, sólo se oye una serie de ruidos aislados, cuyo conjunto no llega á producir, hablando con propiedad, ningun sonido, y cuyo tono es por consiguiente inapreciable; pero conforme crece la velocidad de la rueda, las vibraciones multiplicadas del naipe se trasmiten al aire produciendo un sonido continuo, tanto más agudo cuanto mayor es la velocidad. A la rueda dentada va adaptado un contador que da á conocer el número de vueltas en un segundo de tiempo; este número, multiplicado por el de los dientes, da la mitad del número total de vibraciones, pues es evidente que el naipe, doblado primero en un sentido, vuelve á recobrar su primera forma, dando dos vibraciones simples por cada diente que pasa.

Savart obtuvo de una rueda de 600 dientes hasta 40 vueltas por segundo, y por consiguiente, 48,000 vibraciones simples en igual espacio de tiempo, lo que corresponde, como se verá más adelante, á un sonido en extremo agudo.

La *sirena*, inventada por el físico francés Cagniard-Latour, permite asimismo medir, y con mayor precision que la rueda dentada de Savart, las vibraciones de un sonido determinado.

Produce el sonido en este aparato (fig. 294) la corriente de aire de una caja de fuelles acústicos que pasa por una serie de agujeros abiertos á igual distancia en las circunferencias de dos discos metálicos, uno de los cuales es fijo y el otro móvil (fig. 295). Cuando las aberturas de ambos discos están una frente á otra, la corriente de aire pasa, y obrando su fuerza de impulso en los canales oblicuos que forman las aberturas, pone en movimiento el disco superior. Por consecuencia de este movimiento rotatorio, la coincidencia de los agujeros cesa, se restablece de nuevo para cesar otra vez, resultando de aquí una serie de vibraciones cada vez

más rápidas en el medio que rodea al instrumento. Si este tiene 20 orificios, cada vuelta del disco producirá 20 vibraciones, de suerte que, contando el número de vueltas que se efectúan para un sonido determinado en un segundo, se puede calcular fácilmente el número total de vibraciones. El eje del disco móvil lleva en su parte superior una rosca sin fin, la cual encaja con una rueda dentada que tiene tantos dientes como divisiones hay en un cuadrante exterior. Cuando la rueda avanza un diente, la aguja adelanta una division, por manera que el número de divisiones recorridas por la aguja da el de vueltas, y de consiguiente, en virtud de una simple multiplicacion, se sabe el de las vibraciones sonoras. Al final de cada vuelta, un rastrillo pone en movimiento una segunda rueda, que anda una division, de suerte que si la primera rueda tiene 100 dientes, la aguja del segundo cuadrante señala las centenas de vueltas.

El contador está dispuesto de modo que no funciona sino cuando se quiere, es decir, cuando

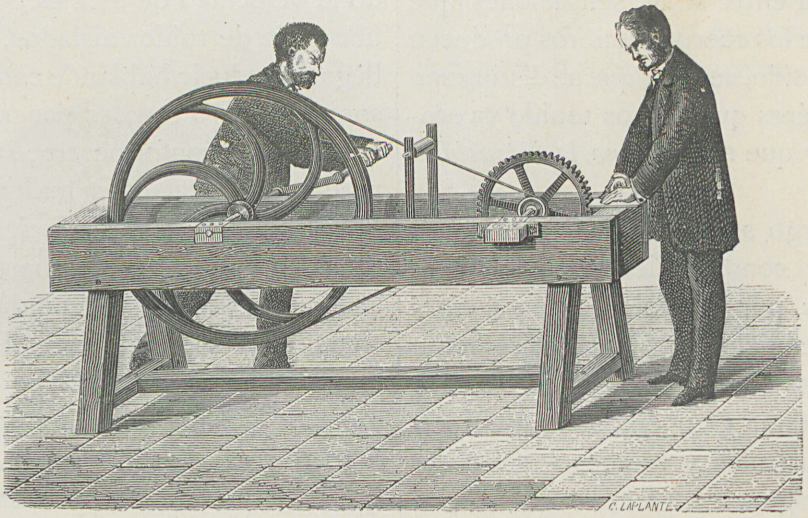


Fig. 293.—Rueda dentada de Savart

la velocidad adquirida ha acabado por producir el sonido cuyo tono se desea averiguar. La dificultad estriba en conservar la constancia de la velocidad, para que resulte un sonido de altura invariable durante un espacio de tiempo suficientemente largo.

La sirena funciona tambien en el agua, siendo entónces el líquido el que, saliendo por los agujeros por efecto de la presion de una columna de agua bastante elevada, produce las vibraciones. El sonido que resulta prueba que los líquidos entran directamente en vibracion como los gases, sin que el sonido les sea comunicado por las vibraciones de un sólido. El nombre de sirena procede precisamente de esta circunstancia, de que el instrumento canta en el agua como las sirenas de la fábula.

La sirena de Seebeck, representada en la figura 296, está construida de muy distinto modo, pero el principio es el mismo, es decir, que el paso del aire por los agujeros de un disco produce el sonido. Un aparato de relojería pone en movimiento el disco, y tambien se calcula con un contador la velocidad de su rotacion. Alrededor hay un colchonete que comunica con una caja de fuelles, y que es el distribuidor de la corriente gaseosa que pasa por unos tubos de goma á la serie de orificios del disco que se propone emplear el experimentador.

Variando el número y la distribucion de los orificios en discos diferentes, se puede hacer con esta sirena una porcion de experimentos.

Por último, merced á ciertos procedimientos gráficos, há poco discurridos, y cuya primera idea pertenece á Duhamel, se puede calcular, ó mejor dicho, contar con exactitud el número de vibraciones sonoras. Un estilete, ó un diapason provisto de una punta muy fina, traza al vibrar líneas onduladas en la superficie de un cilindro giratorio, dado de negro de humo. El número de sinuosidades marcadas de este modo es el de vibraciones (fig. 297). Empléase principalmente este método cuando se quiere comparar el tono ó altura de dos sonidos. Por ejemplo, se puede fijar en el diapason

el estilete que traza las líneas sinuosas, y en otro diapason la lámina cubierta de negro de humo en que estas se marcan. Haciendo vibrar entónces simultáneamente ambos diapasones, la línea sinuosa que quedará trazada será á no dudarlo el resultado de la combinacion de dos movimientos vibratorios, paralelos si los dos diapasones vibran en el mismo sentido, y rectangulares si están situados en ángulo recto. Las figuras 299 y 300 son facsímiles de pruebas

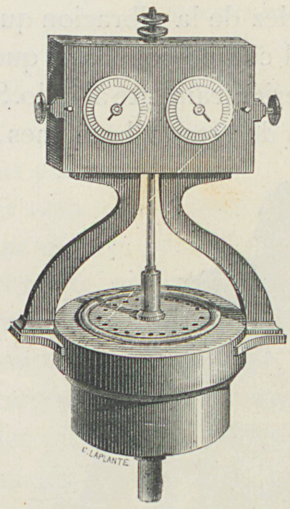


Fig. 294.—Sirena de Cagniard-Latour (vista exterior)

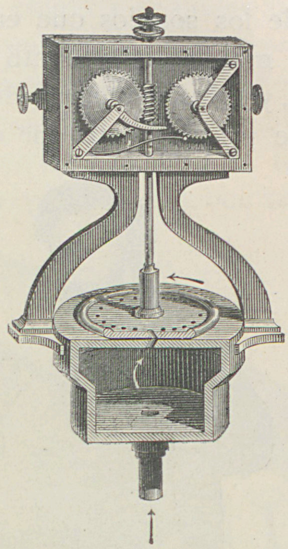


Fig. 295.—Vista interior y seccion de la sirena

obtenidas por ambas combinaciones en diversos intervalos musicales. Volveremos á ocuparnos de este aparato cuando describamos el método óptico de M. Lissajois.

El *fonautógrafo* no difiere de los aparatos anotadores de Duhamel sino porque con él se pueden recoger las ondas sonoras aéreas. Consiste en una ancha paraboloide (fig. 298), cortada en su foco segun una seccion en la que se sujeta una membrana elástica y que tiene precisamente por objeto reflejar y condensar en el foco las ondas sonoras. La membrana puesta en vibracion por estas ondas lleva un estilete que inscribe los movimientos sinuosos en el cilindro, al cual hace girar uniformemente un aparato de relojería.

II

DISTINCION ENTRE LOS SONIDOS MUSICALES Y LOS RUIDOS

Dase generalmente el nombre de *sonidos musicales* á los que pueden ser comparados entre sí por lo que respecta al *tono* ó *altura*, y el de *ruidos* á las sensaciones auditivas cuyo grado de agudeza ó gravedad no puede apreciar el oído. Esta distincion, que cualquiera hace fácilmente, ¿admite una definicion científica ó sólo dimana de la imperfeccion, de la falta de sensibilidad ó de experiencia del órgano del oído? En una palabra, ¿hay una diferencia específica, esencial, entre un ruido y un sonido musical?

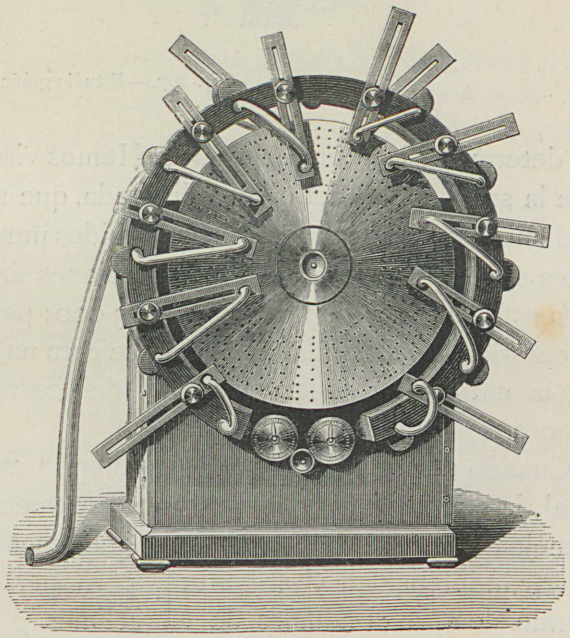


Fig. 296.—Sirena de Seebeck

Empecemos por presentar algunos ejemplos de los dos caractéres de sensacion.

El choque de dos piedras una contra otra, y en general el de dos cuerpos sólidos poco elásticos, ó de forma irregular, el ruido de un carruaje sobre el empedrado, el chasquido de un

látigo, las detonaciones de materias explosivas, el mugido del oleaje, el silbido del viento en los bosques, etc., etc., son ruidos para todo el mundo. Parece imposible, al ménos á primera vista, asignar el tono, la altura musical de estas clases de sonidos. Sucede naturalmente lo contrario respecto de los sonidos que emiten los instrumentos de música, por cuanto la construccion de estos, ya sean de cuerda, de madera ó de metal, tiene precisamente por objeto la produccion de sonidos comparables con relacion á su tono, no obstando para esta cualidad esencial las diferencias de timbre ó de intensidad.

Todavía no sabemos en qué consiste el ruido; pero acabamos de ver que la altura musical de un sonido tan sólo depende de un elemento, de la rapidez de la vibracion que anima las moléculas del cuerpo sonoro, y que este trasmite regular, periódicamente al oído. Siendo conocido el número de estas vibraciones isócronas, es fácil determinar la altura del sonido. Hemos visto que la sensibilidad del oído es limitada, que no podemos comparar y percibir los sonidos musicales sino cuando el número de vibraciones simples está comprendido entre 32 y 73,000; pero la cuestion de sensibilidad no influye para nada en la naturaleza de la vibracion del cuerpo sonoro.

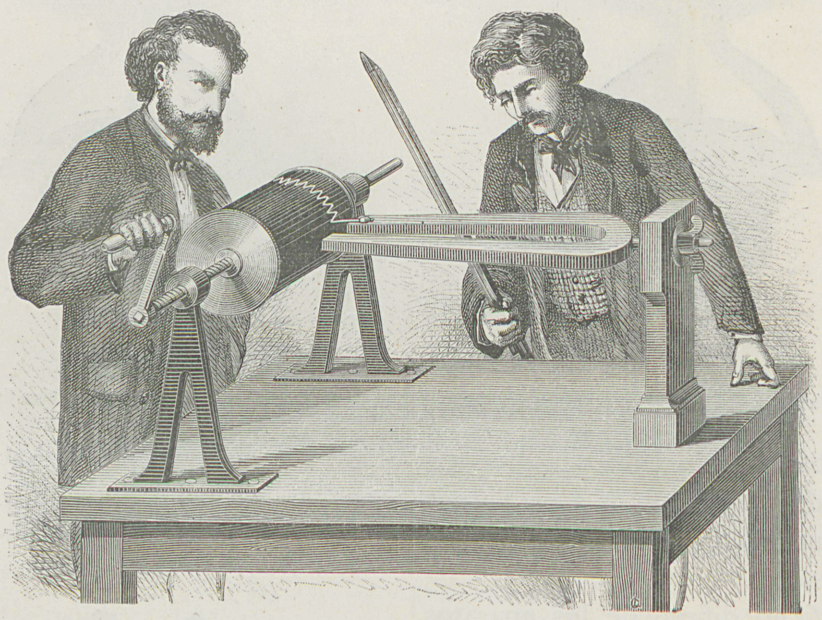


Fig. 297.—Estudio gráfico y anotacion de las ondas sonoras

Cuando se oye solo, aislado, un sonido musical, la sensacion auditiva es constantemente semejante á sí misma; verdad es que pueden variar la intensidad y el timbre, pero persistiendo siempre el número de vibraciones y su sincronismo. Así lo expresa Helmholtz en su *Teoría fisiológica* de la música: «Una sensacion musical afecta al oído como un sonido perfectamente tranquilo, uniforme é invariable; miéntras dura, no se puede distinguir ninguna variacion en sus partes constitutivas.»

La mezcla de dos ó muchos sonidos musicales independientes produce tambien la sensacion de un sonido musical, la cual es más ó ménos agradable, segun la relacion de los tonos de los sonidos componentes. Puede haber disonancia sin que el oído deje de conocer que se trata de sonidos comparables entre sí por lo que respecta á la altura. Sin embargo, la mezcla de sonidos discordantes produce en este caso una impresion muy parecida á la sensacion del ruido, y que lo parecerá tanto más cuanto más corta sea la duracion de cada sonido elemental.

Si se tocan á la vez, brusca y rápidamente, todas las teclas de un piano, ó se las recorre con ligereza desde la primera hasta la última, la cacofonía que resultará se asemejará mucho á lo que llamamos ruido. Lo propio sucederá con un violin, si se pasa muy de prisa el dedo de un extremo á otro de la cuerda tocada con el arco, y áun cuando se conoce que la especie de quejido que resulta está formado de sonidos musicales, el oído recibe sin embargo una impresion análoga á la del viento que zumba ó muge, su-

biendo y bajando. Así pues, la transicion del sonido al ruido parece efectuarse de un modo insensible, de lo cual podria deducirse que ciertos ruidos son mezclas de sonidos musicales, combinados irregularmente fuera de las leyes de la armonía. En este caso, la causa física del sonido deberá proceder de la coexistencia en el aire de un número mayor ó menor de vibraciones, cada una de las cuales puede ser periódica, sincrónica, pero sin que medie ninguna relacion simple entre sus períodos.

Parece haber otra causa para la sensacion del ruido, ó si se quiere, para la dificultad que el oído experimenta en apreciar el tono del sonido; esta causa consiste en la extraordinaria rapidez de la conmocion sonora. El ruido de un martillazo descargado sobre piedra ó madera, el choque de dos piedras, el chasquido de un látigo, la detonacion de un arma de fuego, parecen hallarse en este caso. En las cátedras de física se hacen varios experimentos que demuestran que la imposibilidad de apreciar el tono de estos sonidos es sólo relativa, porque la duracion de su impresion en el órgano auditivo es sobrado corta; pero si se hacen suceder varios ruidos de este género, dicha imposibilidad desaparece. Tomemos, por ejemplo, siete pedazos de madera de forma y dimensiones convenientes; si los tiramos uno tras otro á la calle, el oído solamente percibirá ruidos, cuyo tono no puede apreciar; pero si los arrojamos sucesivamente por órden de mayor á menor, se nota la *gama* de los sonidos tal como se emplea en música. El primero, el tercero y el quinto tirados del mismo modo producen distintamente el *acorde perfecto*. Una prueba por el estilo se hace con tres tubos cilíndricos, cada uno de ellos provisto de un émbolo que entra por frotamiento. Si se levanta bruscamente el émbolo de un tubo, el oído no percibe más que un ruido, pero si se sacan rápidamente los tres uno tras otro, empezando por el cilindro mayor, el oído percibirá tres sonidos que forman tambien el acorde perfecto, con tal que se haya calculado convenientemente la longitud relativa de los tubos.

Cuando se inclina una botella casi llena de agua, como para verter el líquido, penetran sucesivamente en su interior burbujas de aire, y la introduccion de cada una de estas produce un solo ruido; pero si se las hace penetrar rápidamente, se advierte con facilidad que estos sonidos pasan del grave al agudo, siendo entónces comparables con relacion á su tono. Véanse otros dos ejemplos tomados de la *Física* de M. Daguin: «Si se castañetean los dedos haciendo caer bruscamente el medio entre la base del pulgar y el anular apoyado en ella, se puede reconocer la quinta ó poco ménos subiendo y bajando suavemente el meñique de modo que alargue ó acorte la columna de aire contenida entre los dedos. Si se forman sobre una mesa dos pompas de jabon hemisféricas, llenas

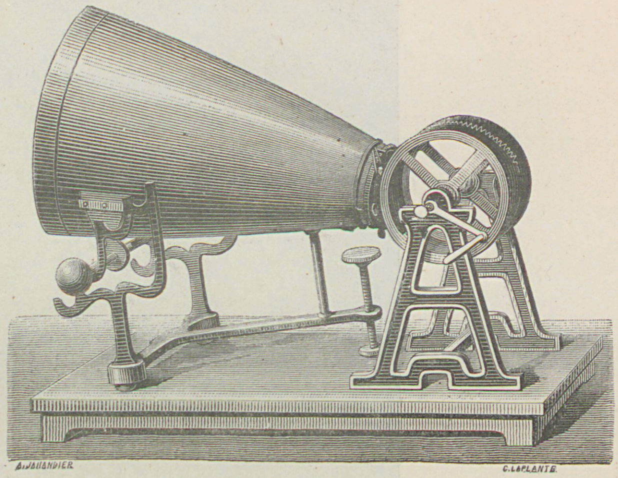


Fig. 298. — Fonautógrafo

de una mezcla de oxígeno é hidrógeno y cuyos diámetros sean entre sí como 1 es á 2, al inflamarlas una tras otra se reconocerá el intervalo de la octava.»

No cabe pues duda de que si se ejercita con asiduidad el oído, se llegará en muchos casos á evaluar la altura de sonidos que, considerados aisladamente, son simples ruidos, y á clasificarlos en el número de los sonidos musicales.

Savart ha procurado averiguar el límite de brevedad de la duracion de los sonidos, por lo que respecta á la posibilidad de apreciar su tono, y de sus experimentos, hechos con la rueda dentada, ha deducido que es posible dar el tono de un sonido cuya duracion no exceda de una cincomilésima de segundo.

Parece, pues, que el ruido difiere del sonido musical, ora porque lo produce una mezcla de sonidos discordantes, ora porque la duracion es sobrado corta para que el oído aprecie el tono del sonido simple que lo constituye. Acabamos de citar ejemplos que justifican la segunda hipótesis. Hé aquí otros que vienen en apoyo de

la primera, y cuyos experimentos se deben tambien al célebre Savart. Para analizar los ruidos (1), para separar entre sí los sonidos confusos de que se les suponia formados, alejábase aquel á distancias variables de una superficie en la que se reflejaban los sonidos, por ejemplo, de una pared vertical. De este modo reconoció que predominan los agudos, si el oído está más cerca de la pared reflectora, y que los más graves se distinguen mejor á medida que el oído se separa de ella. El rumor de las olas, el ruido causado al arrugar un papel que tenia en la mano, analizados de este modo, le hicieron ver que se componian de una porcion de sonidos

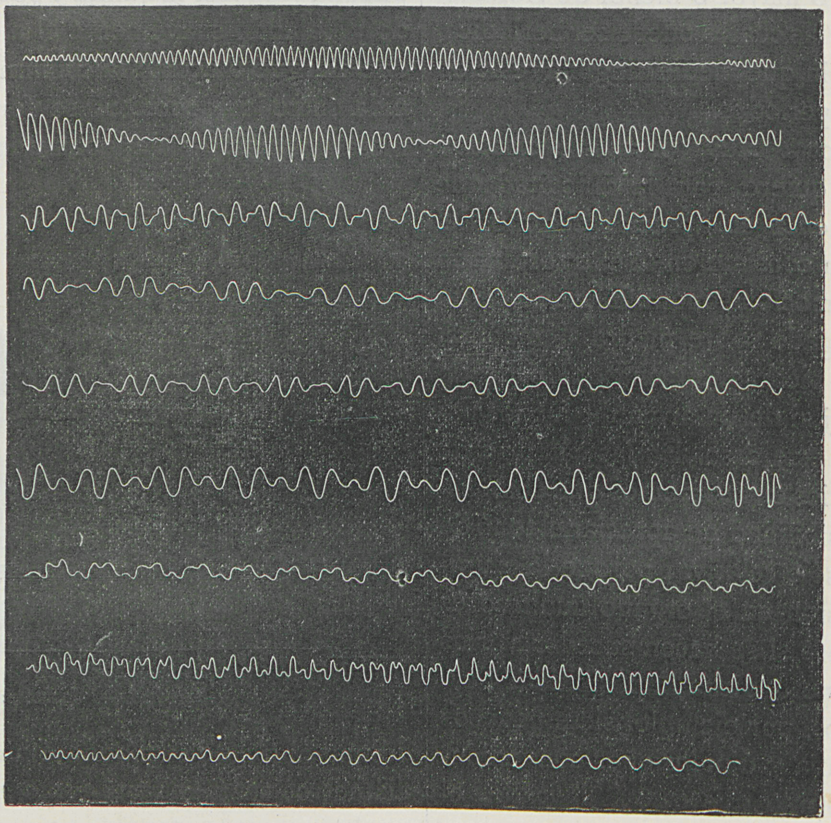


Fig. 299. — Pruebas de la combinacion paralela de dos movimientos vibratorios

que, separados, eran comparables entre sí bajo el punto de vista de la altura ó tono.

Vése, en resúmen, que el sonido musical se caracteriza por la uniformidad, la regularidad, la constancia de las vibraciones periódicas é isócronas del cuerpo sonoro, y por consiguiente, de las ondas sonoras que trasmiten estas vibraciones al oído. Por el contrario, el ruido es efecto de una mezcla de sonidos discordantes y confusos, ó de la extraordinaria brevedad de la duracion de un sonido único, brevedad que no permite al oído apreciar su tono. Los sonidos musicales combinados de modo que satisfagan al oído, es decir, con sujecion á las leyes de la armonía, no son ruidos; pero nada se pareceria más á estos que la mezcla de los sonidos musicales resultantes de todos los instrumentos de una orquesta que tocasen á la vez en todos los tonos, sin ritmo, sin armonía, sin compás. Como las vibraciones así coexistentes en el aire se contrariarian de todos los modos posibles, producirian una verdadera cacofonía.

III

PIEDRAS MUSICALES; FENÓMENOS DEL GEBEL-NAGUS; ESTATUA DE MEMNON

El sonido producido por un cuerpo sonoro en vibracion está tanto más próximo á ser sonido musical cuanto más regulares y simétricas son la forma y dimensiones de este cuerpo, mayor es la elasticidad de la materia que lo constituye, y más homogeneidad tiene esta. Tambien parece entrar por algo en ello el modo cómo se originan las vibraciones. Así por ejem-

(1) Cuando nos ocupemos de la teoria del timbre, veremos cómo ha podido analizar Helmholtz los sonidos compuestos con un aparato muy sencillo, al cual da el nombre de *resonador*.

plo, una piedra arrojada contra el suelo, no suele producir más que ruido; pero si se la dispara con una honda, gira sobre sí misma y el zumbido que de ello resulta es un sonido de tono apreciable; otro tanto sucede, si tirando la piedra sobre un suelo duro, resistente y por consecuencia dotado de cierta elasticidad, se tiene cuidado de imprimirla una rápida rotacion sobre sí misma al lanzarla. Si se la hace rebotar sobre la superficie del agua de un estanque ó charca cubierta de una capa de hielo bastante gruesa, se percibe una sucesion de sonidos que tienen todo el carácter de sonidos musicales; pero en este caso, la capa elástica del hielo entra por algo en el fenómeno.

Colgando de un modo adecuado algunas piedras y haciéndolas chocar, producen á veces sonidos musicales. Hé aquí varios ejemplos relativos á tan singular propiedad, que tomamos del periódico *La Naturaleza:*

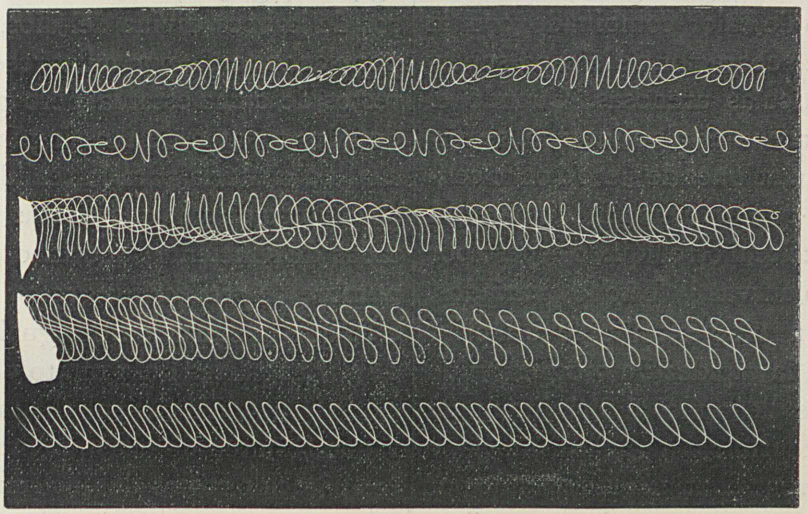


Fig. 300. — Movimientos vibratorios rectangulares

«M. Ricardo Nelson escribe al periódico inglés *Nature* una interesante carta en que habla de ciertas piedras musicales que se encuentran con frecuencia en los alrededores de Kendale, poblacion inmediata á Lancaster, en el Westmoreland. Paseándome por las cercanías de Kendale por montes y riscos, dice este observador, he tenido muchas veces ocasion de recoger ciertos guijarros que aquí llaman «piedras musicales.» Son por lo comun aplanadas, desgastadas por el tiempo, y de raras formas; cuando se las golpea con un hierro ó con otra piedra, emiten un sonido musical, muy diferente del sonido sordo que produciria un guijarro cualquiera. Los sonidos que resultan son por lo regular bastante parecidos, pero sé de algunas personas que tienen ocho piedras de estas, las cuales, golpeadas sucesivamente, dan una octava muy clara y muy distinta. — Recordamos, añade el periódico francés, haber visto en París, en una fiesta pública, un físico callejero, que tocaba trozos de música golpeando con una barrita de hierro ciertas piedras colgadas de hebras de seda. Los sonidos obtenidos eran límpidos y puros, y los guijarros silíceos de formas irregulares.»

Estas piedras armónicas no tienen nada de misterioso; su sonoridad tiene seguramente por causa la homogeneidad y la elasticidad de la especie mineral que las constituye. Hé aquí otro caso que nos explicamos ménos, lo cual quizás consista en lo oscuro de la descripcion: «A un músico distinguido, M. M. Elwart, se le ha ocurrido la idea de dar una palmada en el pilon de la fuente del patio de honor del Instituto, y ha reconocido que este pilon emite un sonido que corresponde con extraordinaria precision al *acorde perfecto mayor* de fa natural.» Que un sonido esté al unísono con el que los músicos llaman el *fa*, convenido; pero que forme por sí solo un acorde perfecto, es cosa que parece muy rara y que el redactor de *La Naturaleza* no explica.

Hé aquí otro caso no ménos curioso, que copiamos de la misma Revista y que fué observado por el capitan Palmer en las vertientes del Gebel-Nagus, colina arenosa inmediata al Sinaí: «La extension de la colina arenosa llega

hasta 60 metros de altura. La arena parece poco diferente de la del desierto circunvecino; sus granos, bastante gruesos, son residuos de cuarzo, de la misma naturaleza que la de las rocas de las cercanías, quebradizos, de fractura amarillenta y quemados por el sol. Esta arena es tan homogénea y tan suelta, que basta el paso de un hombre ó de una acémila, ó una ráfaga de viento para que en aquella cuesta de unos 29° de inclinacion, resulte un desprendimiento de arena que produce un largo reguero. A veces tambien, el exceso de calor combinado con la lluvia produce una separacion de la capa superficial con las partículas arenosas. Cuando el movimiento de la arena es algo intenso, se forman pequeñas ondulaciones de siete ú ocho centímetros de altura, que en cierto modo parecen como si corriera aceite ú otro líquido espeso por un cristal trazando curvas y festones variados. Entónces se oye un ruido extraño; leve al principio, aumenta con la rapidez de progresion de la arena, hasta que llegando al máximum de intensidad, es perceptible á alguna distancia, y dura miéntras la arena continúa resbalando por la cuesta.

»Este sonido es difícil de describir; no es metálico ni vibratorio (1); parécese más bien á las notas más agudas de un arpa eólica, ó al chirrido que se produce al pasar con fuerza un tapon de corcho por un cristal mojado; tambien se le podria comparar con el ruido del aire expulsado rápidamente de un frasco vacío; y ora produce al oído del viajero el efecto de un trueno remoto, ora el de los sonidos graves del violoncelo. Parece que el capitan Palmer observó que las capas superficiales eran más aptas para la sonoridad que las subyacentes. La arena, á la temperatura de unos 40°, es muy movediza por cuanto la sequía la hace resbalar con mayor facilidad; si la arena se desliza cuando hay un poco de humedad en su superficie, el ruido es imperceptible.»

En suma, aquí vemos un fenómeno acústico análogo al de la rueda dentada de Savart, es decir, una multitud de choques, sucesivos en el primer caso, simultáneos á la vez que sucesivos en el segundo, que engendran un sonido musical. El choque es más claro y los granos más elásticos cuando la arena está seca, lo cual se comprende: pero lo que el observador no dice y hubiera convenido saber, es si el sonido variaba de tono como variaba de intensidad á medida que crecia la rapidez descendente del reguero de arena.

(1) No comprendemos lo que entiende el narrador por la frase *no es metálico ni vibratorio*, por cuanto todo sonido ha de ser precisamente lo último.

Una antigua tradicion asegura que al salir el sol, cuando los primeros rayos del astro daban en la estatua colosal de Memnon, en la Tebas egipcia (fig. 301), emanaban sonidos armoniosos de la boca divina del dios, fenómeno que el populacho tenia por milagroso. Aún subsisten restos de dicha estatua, pero ignoramos si están dotados todavía de tan singular propiedad, lo cual no obstaria para la realidad del fenómeno. Acabamos de ver que ciertas piedras están dotadas de suficiente sonoridad para merecer el nombre de *piedras musicales;* y además se concibe que la elevacion desigual de temperatura de varias partes del granito de la estatua ocasione á la salida del sol dilataciones parciales, y que resulten de ellas movimientos moleculares parecidos á los del instrumento de Trevelyan.

Por esto tambien ciertas estufas de palastro, caldeadas con desigualdad en sus diferentes partes, emiten por momentos sonidos muy distintos. Se ha expresado asimismo la opinion de que el aire contenido en las grietas de la piedra, caldeado por los rayos solares, puede entrar en vibracion, reproduciendo así el fenómeno de las llamas cantantes. Pero ántes de disertar sobre la causa probable del hecho, convendrá cerciorarse de su realidad.

IV

LLAMAS SONORAS Ó CANTANTES.—LLAMAS SENSIBLES

¿Qué es una llama? La incandescencia de una vena gaseosa que se desprende de un cuerpo á temperatura elevadísima. Por esta definicion se echa de ver al punto la analogía que existe entre este fenómeno y el de la salida ó desagüe de una vena ó de un chorro líquido. El primer movimiento va acompañado de vibraciones que nacen en el seno del líquido y que, comunicándose al aire ambiente, le hacen vibrar á su vez produciendo sonidos. Podia pues suponerse que en el seno de las llamas se engendraran vibra-

ciones semejantes, pero faltaba comprobar su manifestacion como vibraciones sonoras.

Ciertos casos muy comunes demuestran que la llama va acompañada por lo regular de ruidos. Así por ejemplo, en una chimenea de mucho tiraje, se oye una serie de ruidos cadenciosos que cesan si la llama cesa; si se baja la cortina de la chimenea, el sonido es más intenso, como en las aberturas muy pequeñas de las estufas, lo cual consiste en que siendo mayor la corriente de aire, activa la llama; entónces se percibe un zumbido sonoro que adquiere hasta cierto punto el carácter de sonido musical.

«Si se pasa con rapidez por el aire, dice Tyndall, una bujía que arda tranquilamente, se obtiene una faja de luz denticulada, oyéndose al mismo tiempo un sonido casi musical que denota el carácter rítmico del movimiento. Si se sopla la llama de una bujía sin apagarla, el ruido producido por su agitacion indica tambien una agitacion rítmica.»



Fig. 301. —Estatuas de Memnon

Todo esto se conocia ya; pero no se ha empezado á estudiar científicamente los sonidos que acompañan á las llamas hasta que se hizo el experimento llamado *armónica química*, el cual consiste en la produccion de un sonido musical por medio del desprendimiento de un chorro de hidrógeno inflamado cubierto con un tubo de cierta longitud (fig. 302). Segun Tyndall, el doctor Higgins fué quien observó por primera vez tan extraño fenómeno en 1777. Posteriormente, Chladni, de la Rive, Faraday, Wheatstone, Rijke, Sondhaus, Kunth, y por último, Schaffgotsch y Tyndall han hecho acerca de este asunto observaciones que vamos á resumir sucintamente.

Ocupémonos ante todo del experimento fundamental que consiste en introducir una llama en un tubo de cristal largo y ancho, de modo que se puedan ver los movimientos del chorro gaseoso. Tan luégo como la llama, hasta entónces tranquila é inmóvil, ha penetrado en el interior del tubo, se la ve disminuir de longitud, recobrar luégo su anterior dimension y encogerse de nuevo, siendo cada vez más rápidos estos movimientos de oscilacion. De pronto se oye un sonido continuo, de intensidad sostenida y de carácter claramente musical (1). Entónces la llama parece quedar tan tranquila como ántes de introducirla en el tubo, como si despues de haber dado orígen con sus vibraciones propias á las de la columna de aire, hubiera dejado de moverse. Pero no sucede así; en realidad sigue vibrando, mas la rapidez de sus oscilaciones es tal, que la vista no percibe

(1) Con el aparato de Rijke (fig. 303) se obtiene en un tubo de cristal un sonido cuyo orígen tiene cierta analogía con el del sonido de una llama cantante. Este sonido se produce cuando se ha calentado al rojo una especie de fina red metálica fijada á la tercera parte de la altura del tubo y se ha retirado la llama de alcohol con la cual se ha producido la elevacion de temperatura; cuando la red se enfria, el sonido se extingue.

sino una sensacion continua. Fácilmente se prueba que es así, para lo cual el medio más sencillo es mirar la llama, ya á la simple vista, ó ya con un anteojo, moviendo la cabeza de un lado á otro. Tambien se puede examinar la imágen de la llama con un espejo giratorio, segun el método de Wheatstone. En ambos casos, si la llama estuviese inmóvil y conservara una longitud constante, el ojo experimentaria la sensacion de una faja luminosa continua, de la misma altura que la llama; y así es como aparece en una atmósfera tranquila.

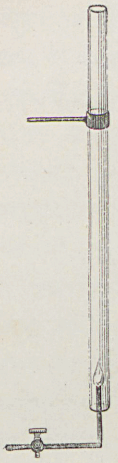


Fig. 302.—Llama cantante

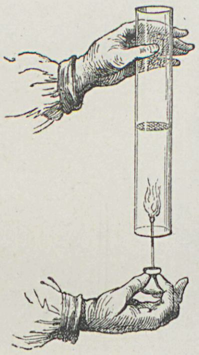


Fig. 303.—Aparato de Rijke

No sucede así cuando el sonido resuena en el tubo; entónces se ve una serie de llamas separadas por intervalos oscuros, y luégo, en estos mismos intervalos, otras llamas más pequeñas y pálidas.

«Cada imágen, dice Tyndall, se compone de una punta amarilla sustentada por una base de un color azul magnífico.»

Es por tanto evidente que las vibraciones del gas se manifiestan por una serie de extinciones y reapariciones de la llama, ó por lo ménos, si la extincion no es completa, como lo prueban los resplandores ménos vivos de los intervalos oscuros, por cambios periódicos de tono y brillo. A veces no es posible ver ningun destello luminoso entre dos imágenes consecutivas.

Si se introduce la llama en el tubo más de lo conveniente, sus agitaciones adquieren mayor amplitud, y rechazándola entónces el aire al interior del tubo, acaba por apagarla. Asimismo sucede que la extincion de la llama va acompañada de una violenta explosion parecida á un pistoletazo (1). Fácil es comprender la explicacion de este fenómeno. «Supongamos, dice Maurat, que en la primera parte de una vibracion, el aire entra en el mechero rechazando la llama ante sí, pero sin enfriarla lo suficiente para apagarla; durante la segunda mitad de la misma vibracion, no saldrá ya del tubo gas puro, sino una mezcla de gas y aire, y su inflamacion deberá producir una verdadera detonacion (2).»

Así pues, los experimentos que acabamos de describir demuestran que las llamas pueden desempeñar el mismo papel que las corrientes de aire ó de líquido con las cuales se conmueven los tubos sonoros; sustituyen por sí mismas los agujeros de la flauta y las boquillas de otros instrumentos, sin las cuales no se producirian las vibraciones. Por consiguiente, se las designa con razon con el nombre de *llamas sonoras* ó *cantantes;* sólo que aisladas no producirian una vibracion bastante intensa para que la percibiera el oído, siendo indispensable el tubo puesto sobre ellas para reforzar el sonido y hacerlo perceptible.

El tono de un sonido emitido por un tubo sonoro, depende, como pronto veremos, de la longitud de este. Lo propio sucede con las llamas sonoras. Si, despues de tomar el unísono de la nota musical que se obtiene con un tubo de longitud determinada, por ejemplo, de un metro, se hace resonar la misma llama en otro de dos metros, el nuevo sonido es precisamente la octava grave del anterior. Con tubos más

(1) Con un tubo de $4^{m},50$ de longitud y de un decímetro de diámetro, y un gran mechero de gas de Bunsen terminado á modo de regadera, obtuvo Tyndall un sonido de tal intensidad, que hizo retemblar el pavimento y los muebles de la habitacion, «y hasta mis oyentes en sus asientos,» añade el célebre físico.

(2) «Observemos acerca de este asunto, dice el mismo profesor, que la mezcla de aire y gas se efectúa siempre más ó ménos completamente en una llama cualquiera, áun ardiendo al aire libre, y no solamente en la superficie, sino en una region muy extensa, puesto que comprende toda la parte luminosa. Si no sobreviene explosion, consiste en que se establece cierto equilibrio entre la llegada del gas y el aflujo del aire exterior, de suerte que los mismos puntos del espacio son asiento de un fenómeno de combustion que no varía notablemente de un momento á otro. No sucede lo propio tan luégo como la corriente gaseosa vibra con fuerza. Las velocidades de que están entónces animados el gas y el aire ambiente y que son alternativamente de sentido contrario, favorecen mucho su mezcla. La combustion es pues intermitente é instantánea, es decir, que se verifica en virtud de una serie de pequeñas explosiones. La última de ellas, ó sea la que produce la extincion de la llama, debe ser por esto mismo de intensidad excepcional, puesto que va inmediatamente seguida de una disminucion considerable en el volúmen de la vena gaseosa, consecuencia de su enfriamiento repentino.»

cortos resultarian sonidos más agudos. Tyndall, al hacer sus amenos experimentos sobre las llamas sonoras, colocó una serie de ocho tubos cuya respectiva longitud habia calculado de modo que al resonar dieran los sonidos de una gama, de la octava grave á la aguda. Con otro tubo movible ó con una corredera de papel que ponia sobre uno de dichos tubos, influia á su albedrío en el tono del sonido, que era más grave cuando la corredera subia, es decir cuando prolongaba el tubo, y más agudo cuando bajaba.

Pero si se comparan los sonidos de las llamas cantantes con los que dan los tubos de órgano de la misma longitud, nótase que estos son más graves. La razon es muy sencilla: la presencia de las llamas eleva la temperatura de las columnas de aire puestas en vibracion, y ya sabemos que el número de vibraciones crece con la velocidad del sonido y por consiguiente con la temperatura, en una misma longitud de onda.

Por lo demás, la altura del sonido depende tambien del tamaño de la llama. «Disminuyendo la cantidad de gas, dice Tyndall, hago cesar el sonido que la llama emite ahora. Pero, tras un momento de silencio, la llama produce un nuevo sonido que es precisamente la octava del anterior. El primero era el sonido fundamental del tubo que rodea la llama, el segundo es el primer armónico de este tubo.» Hé aquí, segun el mismo físico, otro modo de mostrar la influencia de las dimensiones de las llamas en el tono de los sonidos que producen. Se hace emitir el mismo sonido á dos llamas, y en seguida, cerrando un poco la espita del gas, se reduce una tanto la dimension de una de aquellas. Al punto se altera el unísono y se oyen golpecitos á modo de latidos. Tambien se toma un tubo de dos metros de largo, haciéndolo resonar con una gran llama de hidrógeno: si se le sustituye con otro tubo la mitad ménos largo, ya no se oye el sonido musical. «La llama es demasiado grande en este caso, dice Tyndall, para que pueda acomodarse á los períodos de vibracion del tubo más corto. Pero tan luégo como se disminuye la altura de la llama, despide un sonido intenso, la octava del sonido del primer tubo. Quitemos ahora el corto y cubramos de nuevo la llama con un tubo largo; este despedirá entónces, no ya el sonido fundamental que le es propio, sino el del tubo más corto. Para acomodarse la larga columna de aire á los períodos vibratorios de la llama acortada, se divide como en un tubo de órgano abierto, que emite su primer armónico. Se pueden variar las dimensiones de la llama para obtener con este mismo tubo una serie de notas cuyas velocidades de vibracion estén en la relacion de los números 1 : 2 : 3 : 4 : 5, es decir, el tono fundamental y sus cuatro primeros armónicos.»

V

LLAMAS SENSIBLES

Hemos visto que la forma de una vena líquida que desagua se modifica tan luégo como las vibraciones de que es causa son suscepti-

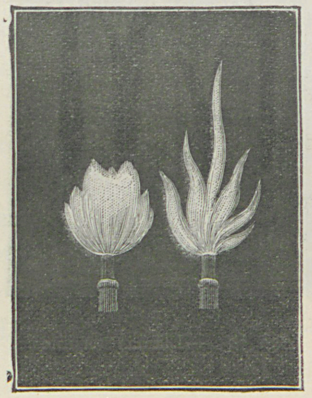


Fig. 304.—Influencia del sonido en las llamas

bles de engendrar un sonido, observándose además la misma modificacion cuando, en la inmediacion de la vena, se produce un sonido de tono casi igual al del sonido que ella sola emitiria. Aquí hay una sensibilidad que se advierte tambien en las llamas cantantes.

Schaffgotsch hizo la primera observacion de este último fenómeno. Habiendo puesto sobre una llama de gas un tubo de escasa longitud, observó que si se emitia un sonido, ya al unísono, ya á la octava superior de la nota dada por la llama sonora, esta empezaba á agitarse, á vibrar, y hasta se apagaba, cuando el sonido emitido adquiria cierto grado de intensidad. ¿Cuál era la causa de tan rara agitacion?

El siguiente es otro caso descubierto casi simultáneamente por Tyndall. Si al introducir en el tubo una llama silenciosa todavía, se ele.

va convenientemente el sonido de la voz, la llama se pone á cantar: se interrumpe si se interrumpe la voz y vuelve á cantar al unísono si esta empieza de nuevo su canto. Véase, segun Tyndall, las condiciones del experimento: «Cubro la llama con un tubo de 30 centímetros de largo, de modo que quede á 3 ó 4 centímetros de distancia del extremo inferior. La emision de la nota conveniente hace temblar la llama, pero no cantar. Bajo el tubo de modo que la distancia de la llama al extremo inferior sea 7 centímetros, y al punto comienza su canto. Entre estas dos posiciones hay otra en que la llama no rompe el silencio espontáneamente, sino tal, que cuando ha sido excitada por la voz, canta y continúa así indefinidamente.»

Esta sensibilidad de las llamas que, además del nombre de *llamas sonoras* ó *cantantes*, ha hecho que se les dé tambien el de *sensibles*, esta facultad de experimentar movimientos vibratorios de cierta periodicidad y de resonar al unísono con las voces que se emiten cerca de

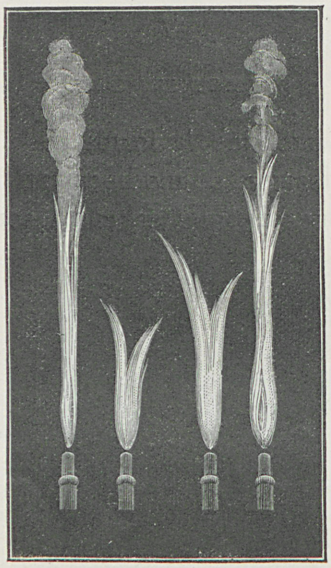


Fig. 305.—Llamas sensibles

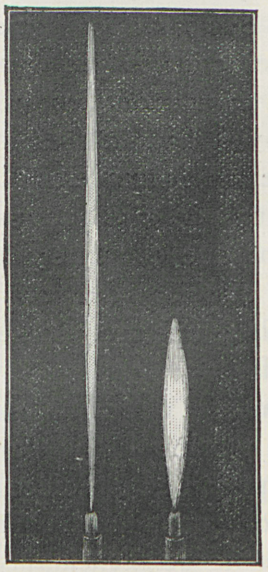


Fig. 306.—Llama sensible: experimento de Tyndall

ellas, permite, por decirlo así, utilizarlas en el análisis de los sonidos compuestos.

Las llamas desnudas, es decir, las que arden al aire libre sin que las cubra ningun tubo, están sometidas á la misma influencia y manifiestan igual sensibilidad: el profesor Leconte hizo la primera observacion de este caso nuevo. Tyndall y Barret han hecho experimentos muy variados sobre este curioso asunto. Limitémonos á citar algunos.

Hagamos observar desde luégo que no todas las llamas son sensibles. Leconte habia notado ya que la llama de los mecheros de gas en que hizo sus observaciones no se ponia á vibrar hasta que la presion creciente la hacia llegar al punto en que está próxima á zumbar. «Tenemos una bujía encendida, dice Tyndall; podemos gritar, palmotear, tocar un silbato, dar martillazos en un yunque, ó hacer que estalle una mezcla explosiva de oxígeno é hidrógeno, sin agitar su llama. Aunque, en cada uno de estos casos cruzan el aire ondas sonoras muy enérgicas, la bujía es absolutamente insensible al sonido, no advirtiéndose movimiento alguno en su llama. Pero con este pequeño soplete lanzo contra ella una tenue corriente de aire, que produce un principio de temblor al mismo tiempo que disminuye su resplandor. Y ahora, tan luégo como hago resonar el silbato, la llama salta visiblemente.»

Como la llama en forma de cola de pescado de un mechero de gas ordinario es insensible á todos los sonidos que se emiten cerca de ella, basta dar vuelta á la llave y aumentar la presion para que se agite al punto al resonar un silbato; su forma de abanico se torna entónces en una llama de seis ó siete lenguas separadas (figura 304).

Las llamas más sensibles deben tener bastante altura, de 25 á 30 y hasta 45 centímetros; mas, por otra parte, segun las circunstancias, las vibraciones sonoras tan pronto las

alargan como las acortan. Tyndall elige dos llamas, la una larga, derecha y humosa; la otra corta, bifurcada y brillante. El mismo silbido produce una trasformacion singular: la primera llama se convierte, por decirlo así, en la segunda, y recíprocamente (fig. 305).

Terminemos lo referente á este asunto haciendo mencion de otros dos experimentos notables que el célebre físico inglés ha reproducido en sus interesantes conferencias sobre el sonido.

«La llama más maravillosa de cuantas se han observado hasta aquí es la que teneis á la vista. Sale del orificio de un mechero de esteatita y se eleva á 60 centímetros de altura. Un leve golpe dado en un yunque colocado á gran distancia, la reduce á 17 centímetros. Los choques de un manojo de llaves la agitan con violencia y se oyen sus fuertes zumbidos. Hagamos caer en la mano una moneda de 50 céntimos sobre otras gruesas de cobre, estando situados á 20 metros de distancia; este choque tan leve hace decaer la llama. No puedo andar por el pavimento sin agitarla. El crujido de mis botas la pone en conmocion violenta, produciéndose el mismo efecto si se arruga ó rasga un pedazo de papel, ó se roza una tela de seda. Una gota de lluvia que caiga parece sobresaltarla. Se ha puesto cerca de ella un reloj de bolsillo: ninguno de vosotros percibe el movimiento del volante; sin embargo, ved el efecto que hace en la llama, cada pulsacion la abate; si se acelera el movimiento, conviértese en un espantoso tumulto para la llama. El canto de un gorrion colocado á bastante distancia basta para menguarla; el del grillo produciria sin duda el mismo efecto. Yo he siseado, situado á 30 metros de distancia, y al punto se ha acortado la llama zumbando» (fig. 306).

Esto por lo que se refiere á la extraordinaria sensibilidad de ciertas llamas que arden al aire libre. Veamos ahora qué eleccion puede hacerse en ellas de las notas predominantes en los sonidos compuestos, que de este modo desempeñan el papel de las llamas manométricas de Kœnig y de los resonadores de Helmholtz, de que nos ocuparemos más adelante.

Considerando una llama larga, recta y brillante, que el más leve ruido reduce al tercio de su longitud y su brillo al de un resplandor pálido apénas perceptible, Tyndall le da el nombre de *llama de vocales*. Y en efecto, no todas las vocales afectan del mismo modo su sensibilidad. La llama en cuestion es sensible, no por lo que respecta al sonido fundamental de cada vocal, sino al armónico predominante que constituye su timbre. «Articulo con voz fuerte y sonora el diptongo *ou* y la llama no se mueve; pronuncio la vocal *o* y tiembla; articulo la *e*, y se estremece con fuerza. Pronuncio sucesivamente las palabras *boot* (pronúnciese *but)*, *boat* (bot) y *beat* (bit), y la primera no produce efecto, la segunda agita la llama, y la tercera causa en ella una conmocion violenta. El sonido *ah!* es todavía mucho más poderoso. Esta llama es en particular sensible á la articulacion de la consonante silbante *s*. Que la persona más lejana de las que me escuchan me haga el obsequio de sisear ó de pronunciar *hiss*, y verá la simpática acogida que le dispensa la llama. El silbido comprende los elementos más aptos para obrar enérgicamente sobre ella. Por último, pongo sobre esta mesa esta caja de música y la hago tocar cualquiera de sus piezas: la llama se porta como un sér sensible, saludando ligeramente á ciertos sonidos, y acogiendo los otros con profunda reverencia.» (*El Sonido*, VI.)

VI

INFLUENCIA DEL MOVIMIENTO EN EL TONO DEL SONIDO

Dopler fué el primero que se ocupó en una Memoria publicada en 1842 *Sobre los colores de las estrellas dobles*, de la influencia que puede ejercer el movimiento en la sensacion de un observador cuando el foco de las ondas sonoras ó luminosas se acerca ó se aleja de él en virtud de este mismo movimiento. Examinaba los dos casos en que, ó bien el observador está inmóvil y el foco se desvia aproximándose á él, ó aquel es el que se mueve en direccion de este, permaneciendo el foco fijo.

Considerando por el momento las ondas sonoras únicamente, deducia que el tono de un sonido se eleva tan luégo como disminuye la distancia entre el cuerpo sonoro y el observador, y que por el contrario baja cuando aumenta esta distancia.

Fácil es formarse idea de la variacion de la

tonalidad de un sonido á la par del movimiento del cuerpo sonoro ó del observador, variacion que en cierto modo es tan sólo aparente, puesto que, por hipótesis, el cuerpo sonoro no deja de efectuar el mismo número de vibraciones por segundo.

Citemos un ejemplo á propósito para que se comprenda la explicacion del fenómeno notado por Dopler.

Supongamos al observador inmóvil en O (figura 307), y al foco sonoro en S. Admitamos que la velocidad del sonido sea en tal momento de 340 metros por segundo, y que el foco marcha hácia O con una velocidad diez veces menor, ó sea á razon de 34 metros por segundo. Al cabo de un segundo, la primera onda sonora emanada de S habrá recorrido la distancia SA igual á 340 metros, y el cuerpo sonoro se habrá situado á su vez en S', á 34 metros de su punto de partida. Para fijar las ideas, supongamos tambien que efectúa 80 vibraciones por segundo. Habrá pues enviado ante sí 80 ondas sonoras, y la última partirá de S' al principio del segundo siguiente. Mas para llegar á A no tendrá ya que cruzar sino la distancia S'A, que equivale á los $^9/_{10}$ de segundo, de suerte que

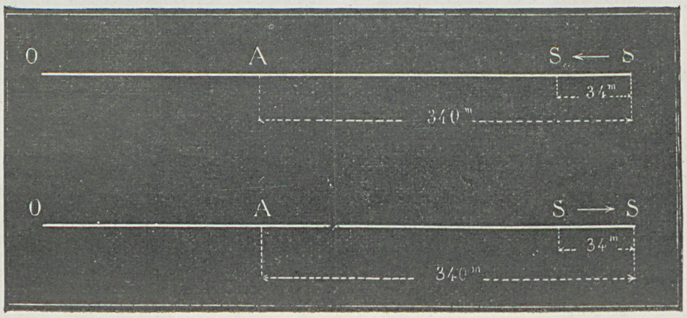


Fig. 307. — Influencia del movimiento en la altura del sonido

en este espacio de tiempo el punto A habrá recibido 80 ondas sonoras, puesto que todas las ondas emanadas del foco habrán efectuado sucesivamente su paso hácia él. Sucederá lo propio en los segundos siguientes, y claro está que lo que decimos del punto A es aplicable á cualquiera otro de la direccion, y por consiguiente, al observador mismo, situado en O.

Así pues, la tonalidad del sonido resultará aumentada en razon del número de vibraciones que el foco emite en un tiempo representado por 10 con el que emite en el tiempo 9: en lugar de 80, será en este caso $\frac{80 \times 10}{9} = 88,88$. En términos generales, el aumento en el número de vibraciones se mide por la relacion entre la velocidad del foco sonoro por una parte, y la diferencia entre esta velocidad y la del sonido por otra.

Fácilmente se comprende que si el foco sonoro se aleja del observador, el número de vibraciones recibidas por éste disminuirá y esto (en el ejemplo citado) en la relacion de 10 á 11: le parecerá que el sonido ha bajado de altura ó tonalidad, como si el foco no efectuase más que 72,72 vibraciones en lugar de 80.

Si suponemos ahora que, estando el foco sonoro inmóvil, es el observador el que se acerca en su direccion, deben resultar fenómenos semejantes, conforme lo comprenderemos apelando al mismo raciocinio. Hay, sin embargo, una diferencia y es que el aumento en la tonalidad se medirá en este caso por la relacion que indicaba más arriba la disminucion de la altura ó tono, y recíprocamente. En vez de 80 vibraciones, llegarian á oídos del observador 87,27 en el primer caso y sólo 71,11 en el segundo.

Creemos suficiente cuanto precede para mostrar cómo puede tener influencia el movimiento, ya proceda del foco sonoro ó bien del observador, en la altura del sonido, en su tonalidad. Réstanos indicar algo acerca de los experimentos hechos para comprobar estas previsiones de la teoría.

Ya en 1845, hizo M. Buys Ballot en Holanda y en el ferro-carril de Utrecht á Maarsen una serie de experimentos: el silbato de una locomotora producia el sonido, y varios músicos de oído experto, situados en la vía, delante y detrás de la locomotora, apreciaban las variaciones del tono á medida que la máquina se acercaba ó se alejaba con velocidad

determinada. M. Vogel hizo en 1876 experimentos análogos.

M. Fizeau y M. Mach instalaron, en 1848 y en 1860 respectivamente, ciertos aparatos que tenian por objeto la comprobacion de los fenómenos descritos por Dopler.

M. Kœnig ha discurrido otro método de comprobacion, que consiste en hacer vibrar simultáneamente dos diapasones afinados de modo que dieran cierto número de pulsaciones por segundo. Al principio se los coloca uno junto á otro, y luégo se aproxima el más grave al oído casi á la distancia de una longitud de onda, notándose que hay una pulsacion ménos por segundo: si se hubiera acercado el diapason más agudo habria una pulsacion más. M. Schüngel ha hecho numerosos experimentos por este método. Con todos ellos se ha conseguido poner en evidencia los fenómenos que Dopler estudió por vez primera en su Memoria; pero siempre quedaban incertidumbres sobre la conformidad de las fórmulas de este físico con los resultados obtenidos por los otros físicos que hemos citado.

Quesneville emprendió últimamente el estudio completo de esta interesante cuestion, efectuando sus experimentos, basados en el método de las pulsaciones, con un aparato de su invencion que, gracias á la inscripcion gráfica de los resultados, los daba rigurosamente exactos. No podemos entrar en la descripcion detallada de sus observaciones, por lo cual remitimos á su Memoria al lector deseoso de profundizar el estudio de este asunto.

CAPÍTULO VII

LEYES DE LAS VIBRACIONES SONORAS EN LAS CUERDAS, TUBOS Y PLACAS

I

VIBRACIONES DE LOS CUERPOS ELÁSTICOS

La música es hoy un arte tan definido, que cualquiera conoce el mecanismo de los instrumentos de cuerda, como por ejemplo, el violin.

Entre dos puntos fijos se ponen tirantes por medio de clavijas cuatro cuerdas de grueso desigual y de diferente naturaleza, las cuales emiten sonidos de varios tonos cuando se las pulsa ó se las frota trasversalmente con un arco. Los sonidos despedidos por las cuerdas *en vacío* (es decir, vibrando en toda su longitud) deben tener entre sí ciertas relaciones de altura, de las que en breve trataremos. Cuando desaparece esta relacion, el instrumento no está á tono. ¿Qué hace entónces el músico? Templa más ó ménos, apretando ó aflojando las clavijas, las cuerdas que no dan los sonidos deseados; si las templa más, el sonido será más agudo; si ménos, será más grave. Como con cuatro sonidos no habria bastante para emitir las muchas notas de que consta un trozo de música, el ejecutante los multiplica á su albedrío, poniendo los dedos de la mano izquierda sobre este ó el otro punto de cada una de las cuerdas, con lo cual reduce á distintas longitudes las partes de las mismas que el arco hace vibrar.

Estos hechos demuestran que median ciertas relaciones entre los tonos de los varios sonidos emitidos por un instrumento, y las longitudes, grosores, tensiones y materias de las cuerdas; y como esos tonos dependen á su vez del número de las vibraciones ejecutadas, resulta forzosamente que este número está unido por ciertas leyes á los elementos enumerados más arriba. Los filósofos antiguos, y en especial los pitagóricos, habian adivinado alguna de dichas leyes; pero los geómetras del siglo pasado, entre los cuales haremos mencion de Taylor, Bernouilli, d'Alembert, Eulero y Lagrange, fueron los que dieron su explicacion completa, deducida de la teoría. La experiencia ha confirmado la exactitud de sus cálculos.

Estas leyes son las que ahora vamos á definir. Hoy es fácil comprobarlas con un instrumento particular llamado *sonómetro*, al cual va unido alguno de los aparatos que sirven para contar las vibraciones de los sonidos. El sonómetro ó monocordio (fig. 308) consiste en una

caja que tiene por objeto reforzar los sonidos; sobre ella hay una ó varias cuerdas sujetas en sus extremos por pinzas de hierro y tirantes por medio de pesas que sirven para medir las sensaciones de cada una de ellas. Por debajo de las cuerdas hay una regla graduada, la cual sirve para valuar las longitudes de las partes vibrantes, longitudes que se pueden cambiar con un caballete movible que corre á lo largo de la regla y debajo de las cuerdas.

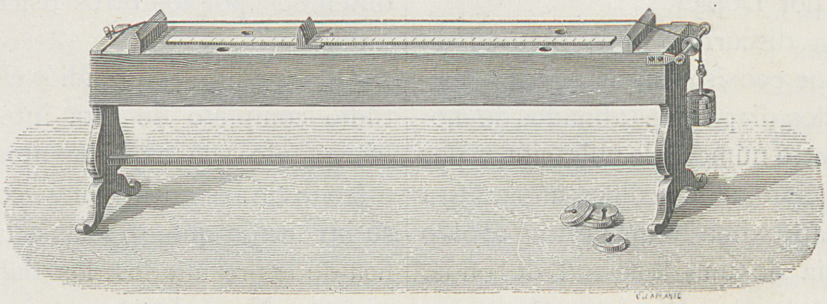


Fig. 308.—Sonómetro

Consideremos una cuerda cualquiera, de intestinos ó metálica: estirémosla con una pesa lo suficiente para que, pulsada ó frotada con un arco, dé un sonido perfectamente puro y cuyo tono sea apreciable al oído. Supongamos que su longitud total medida con la regla es de $1^m,20$ y que el sonido que emite corresponde á 440 vibraciones por segundo, comprobadas con la sirena. Pongamos el caballete movible sucesivamente á la mitad, al tercio, al cuarto, al duodécimo, etc., de la longitud total, y en cada una de estas posiciones hagamos vibrar la porcion más corta de la cuerda. Valuando los diferentes sonidos resultantes, tendremos los siguientes

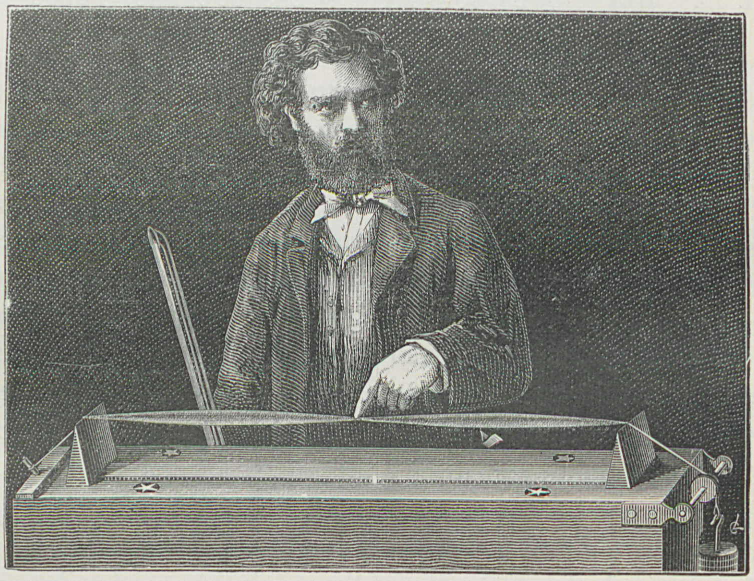


Fig. 309.—Sonidos armónicos: produccion de la octava

números de vibraciones por segundo: 880, 1,320, 1,760 y 5,280.

Bastará ahora comparar los números que marcan las varias longitudes de la cuerda con los que indican el número de vibraciones, para que resulte la ley:

Número de vibraciones.	120	60	40	30	10
	ó 1	½	⅓	¼	$^1/_{12}$
Longitud de la cuerda. .	440	880	1,320	1,760	5,280
	ó 1	2	3	4	12

En virtud de este experimento, ¿no es evidente que los números de las vibraciones van creciendo de modo que están precisamente en razon inversa de la que forman entre sí las longitudes de las cuerdas?

Tal es la primera ley de las vibraciones de las cuerdas.

Ahora, si estiramos la cuerda con pesas diferentes, sin variar la longitud, y comparamos los sonidos obtenidos, veremos que para un número de vibraciones doble, triple, cuádru-

ple, etc., las tensiones de las cuerdas deben ser 4, 9, 16,..... veces más considerables. Como el número de vibraciones sigue el órden de los números simples, los pesos ó tensiones siguen el de sus cuadrados.

Las cuerdas son de forma cilíndrica: variemos el diámetro de los cilindros, y comparemos los sonidos producidos por dos cuerdas de la misma naturaleza, tensas con pesos iguales y de longitud idéntica, pero de distintos diáme-

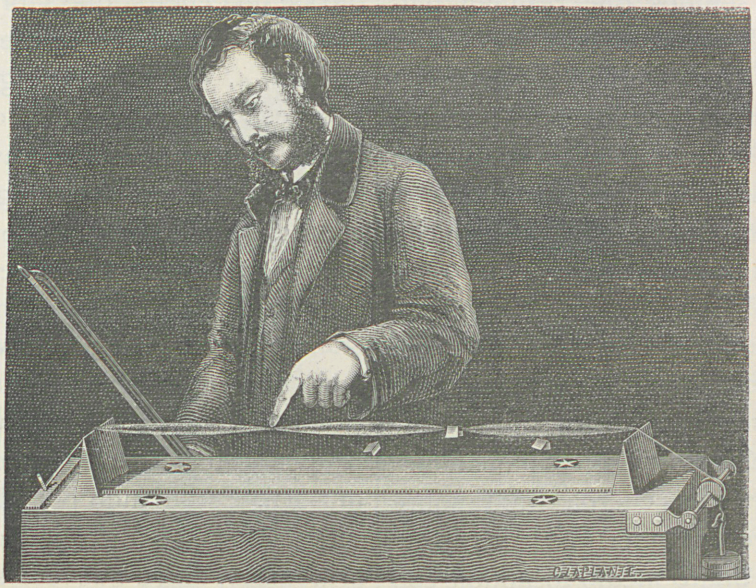


Fig. 310. — Sonidos armónicos: nodos y vientres de una cuerda vibrante

tros. Fácil será hacer esta comparacion con el sonómetro, y entónces veremos que el número de las vibraciones de estos sonidos disminuye cuando los diámetros de las cuerdas aumentan, siendo precisamente 2, 3, 4..... veces mayor.

Esta es la tercera ley de las vibraciones trasversales de las cuerdas.

Hay otra, que, así como las anteriores, se puede comprobar con el sonómetro, y que se refiere á la densidad de la sustancia de que está formada la cuerda vibrante. Por medio de pesas iguales se tensan sobre el aparato dos cuerdas, una de hierro y otra de platino, de diámetro y longitud iguales. Los sonidos que despidan se-

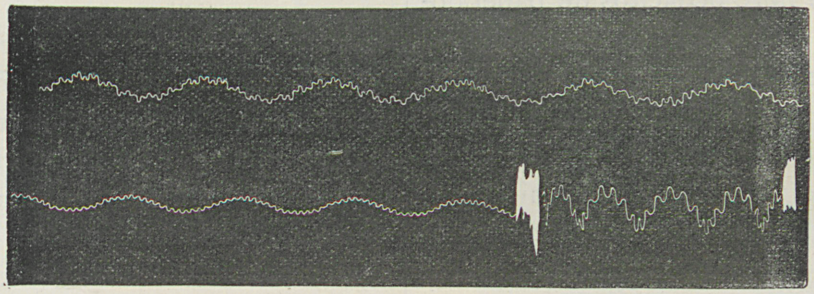


Fig. 311. — Prueba gráfica de vibraciones compuestas: sonidos armónicos

rán tanto más graves cuanto mayor sea la densidad, de suerte que la cuerda de hierro emitirá el sonido más agudo y la de platino el ménos alto; el oído bastará para apreciar estas diferencias.

Pues bien, valuando los números exactos de vibraciones que corresponden á los dos sonidos obtenidos, tendremos:

Para el hierro.	1,640
Para el platino.	1,000

Entiéndase que aquí no tratamos de los números en sí mismos, sino de sus relaciones. Ahora bien, si se multiplica cada uno de estos números por sí mismo, si se le eleva al cuadrado, tendremos 2.689,000 y 1.000,000 que expresan precisamente, en órden inverso, las densidades de dichos metales. La densidad del hierro es 7,8, la del platino 21,4, y estas densidades son entre sí como 1,00 es á 2,69. Tal es la ley: en igualdad de condiciones, los cua-

drados de los números de vibraciones están en razon inversa de las densidades de las materias de que están formadas las cuerdas vibrantes.

En todo cuanto precede sólo nos hemos referido á las vibraciones trasversales de las cuerdas, es decir, á los sonidos que resultan pulsándolas ó frotándolas con un arco de violin. Una cuerda frotada en el sentido de su longitud, por ejemplo con un pedazo de paño untado de colofonia, despedirá tambien un sonido, pero este será mucho más agudo, de suerte que el número de vibraciones longitudinales es mucho mayor que el de las trasversales.

Terminaremos lo relativo á las cuerdas vibrantes haciendo mencion de un fenómeno de gran interés; nos referimos á la formacion de los *nodos* y *vientres sonoros*, y de los sonidos particulares que los músicos y físicos llaman *armónicos*. Consideremos una cuerda tirante sobre el sonómetro ó sobre cualquier instrumento de música. Fijemos su punto medio tocándole con el dedo y probemos con el arco una de las mitades que así resultan: el sonido producido será, como debe suponerse, más agudo que el fundamental, por haberse duplicado el número de vibraciones. Musicalmente hablando, es la *octava* del sonido fundamental. Pero lo más particular es que las dos mitades de la cuerda vibran al mismo tiempo, lo cual se puede comprobar de dos modos: haciendo cabalgar sobre la parte media de la mitad libre pedacitos de papel doblados que saltan y caen cuando se produce el sonido, ú observando á la simple vista el rehenchimiento de las dos mitades de la cuerda (figura 309). Retirando el dedo sin dejar de frotar el arco, se observa tambien que el sonido persiste, así como la division de la cuerda en dos partes que vibran simultáneamente.

Hagamos ahora otro experimento, y pongamos el dedo en la tercera parte de la cuerda frotando con el arco la parte más corta (fig. 310). El sonido será más agudo todavía, y veremos que la totalidad de la cuerda se subdivide en tres partes iguales, que vibran aisladamente, lo cual se comprueba poniendo papelitos doblados en los puntos de division, así como en medio de cada tercio de la cuerda. Los primeros no se mueven; los otros caen, lo cual indica que hay puntos inmóviles ó *nodos* y puntos vibrantes, cuya parte media es lo que se llama un *vientre*. Los nodos y los vientres sonoros se distinguen muy bien sobre un fondo oscuro. Los primeros presentan la cuerda blanca reducida á su propio espesor; los otros, dilataciones ó rehenchimientos parecidos á los que hemos indicado en medio de una cuerda que vibra en su totalidad.

De esta suerte se puede dividir una cuerda en 2, 3, 4, 5, etc., partes iguales, y los sonidos progresivamente agudos que entónces emite son *sonidos armónicos*. Las personas de oído ejercitado llegan á distinguir algunos de los sonidos armónicos que se producen simultáneamente, del sonido fundamental de una cuerda pulsada al aire, lo cual demuestra que la division de la cuerda en partes vibrantes sobreviene áun cuando la fijacion de un punto no sea su causa determinante. Ya veremos qué grado ocupan estos diferentes sonidos en la escala musical. Estudiando por el método gráfico las vibraciones sonoras que engendran los sonidos armónicos, se ve que estos son sonidos compuestos cuyas vibraciones simples se sobreponen (fig. 311). Los nodos y los vientres sonoros no son exclusivamente propios de las cuerdas vibrantes; tambien los encontraremos en las columnas de aire que vibran en el interior de los tubos, y hasta en las placas y en las membranas.

II

LEY DE LAS VIBRACIONES EN LOS TUBOS SONOROS

Los instrumentos de música llamados *instrumentos de viento* se componen de tubos sólidos, ora prismáticos ó bien cilíndricos, unos de forma rectilínea y otros más ó ménos curvos. Por una embocadura, cuya forma y dimension varían segun los instrumentos, se pone en vibracion la columna de aire contenida en estos tubos. Cuando nos ocupemos de las aplicaciones de la Acústica á las artes, tendremos ocasion de describir las principales clases de aquellos; mas para conocer las leyes generales que rigen las vibraciones de las columnas gaseosas contenidas en los tubos, nos limitaremos á considerar aquí los rectos en forma de prismas ó de cilindros, como los que hay en los órganos.

Las figuras 312 y 313 representan la vista exterior y la seccion ó vista interior de dos tubos de esta clase. En la parte inferior de cada uno de ellos se ve el conducto por donde pene-

tra el aire emitido por un fuelle acústico: la corriente entra primeramente por una caja, y luego se escapa por una abertura angosta que se llama *luz*, yendo á romperse contra la arista de una placa cortada á bisel. Una parte de la corriente sale por la boca al exterior del tubo, miéntras que la otra parte penetra en el inte-

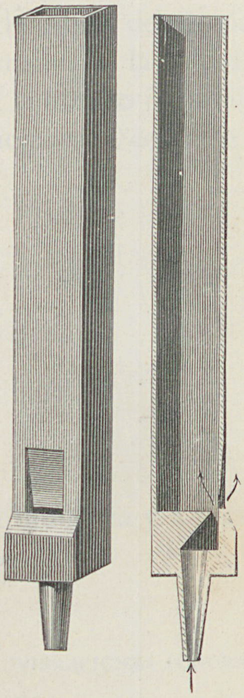


Fig. 312.—Tubos sonoros prismáticos de embocadura de flauta

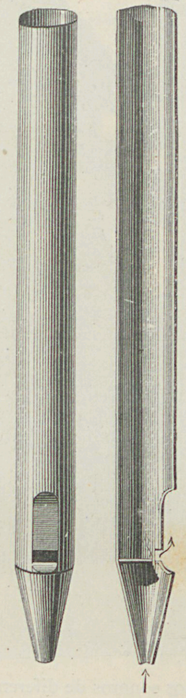


Fig. 313.—Tubos sonoros cilíndricos de embocadura de flauta

rior. La rotura de la corriente da lugar á una serie de condensaciones y dilataciones que se propagan por la columna gaseosa; el aire de esta columna entra en vibracion y produce un sonido continuo, cuya altura varía, segun veremos, con arreglo á ciertas leyes. La embocadura que acabamos de describir es la llamada *de flauta*. La experiencia demuestra que si en unos mismos tubos se ponen sucesivamente embocaduras de diversas formas (por ejemplo, las de lengüeta, batientes ó libres, que describiremos más adelante), sólo se modifica el timbre del sonido sin alterar su tono. Tampoco depende este de la materia de que está formado el tubo, bien sea madera, marfil, metal, vidrio, etcétera, de donde debe deducirse que el sonido resulta únicamente de las vibraciones de la columna de aire.

La acústica es deudora al Padre Mersenne y á Daniel Bernouilli del descubrimiento de las leyes á que obedecen las vibraciones de los tubos sonoros. Vamos á indicar sucintamente las más sencillas.

El Padre Mersenne hizo ver que si se comparan los sonidos emitidos por dos tubos semejantes, aunque de distintas dimensiones, es decir, que todas las de uno de ellos sean dobles, triples, etcétera, que las del otro en todos sentidos, los números de las vibraciones del primero serán 2, 3, etc., veces menores que las de las vibraciones del otro; por consiguiente, el tubo más pequeño de los representados en la figura 314 dará doble número de vibraciones que el más grande, y el sonido que emita será la octava del emitido por el tubo mayor. El descubrimiento de ésta ley se debe al Padre Mersenne.

Los tubos están unas veces abiertos y otras cerrados por su parte superior; pero la ley que vamos á enunciar es tan aplicable á unos como á otros con tal que su longitud sea grande comparativamente á sus demás dimensiones. Ante todo conviene observar que cada tubo puede emitir muchos sonidos, tanto más agudos ó elevados cuanto mayor sea la velocidad de la corriente de aire. Dase el nombre de *sonido fundamental* al más grave de ellos; los demás son los *armónicos*, y para que resulten basta forzar progresivamente la corriente de aire. Finalmente, cuando se hace resonar tubos de varias longitudes, se reconoce que los más largos despiden los sonidos fundamentales más graves,

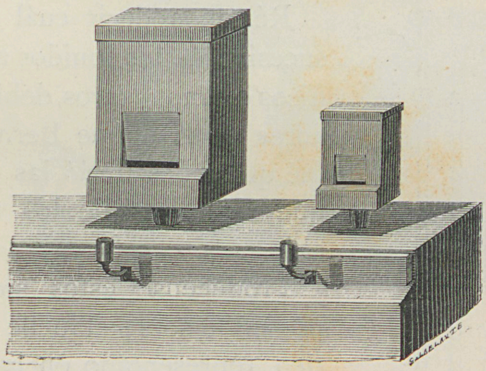


Fig. 314.—Ley de las vibraciones en tubos semejantes

de suerte que los números de vibraciones están precisamente en razon inversa de las longitudes. Por ejemplo, miéntras el menor de los tubos representados en la figura 315 da 12 vibraciones, los otros tres darán en el mismo tiempo 6, 4 y 3, es decir, 2, 3 y 4 veces ménos, siendo, por el contrario, sus longitudes 2, 3 y 4 veces mayores. Repetimos que esta ley es tan

aplicable á los tubos abiertos como á los cerrados.

Pero en los de igual longitud, el sonido fundamental de un tubo cerrado es diferente del mismo sonido dado por un tubo abierto. Las vibraciones sonoras son en él dos veces ménos



Fig. 315.—Ley de las vibraciones de los tubos sonoros de diferentes longitudes

numerosas, lo que equivale á decir que el sonido fundamental de un tubo cerrado es el mismo que el de uno abierto de doble longitud.

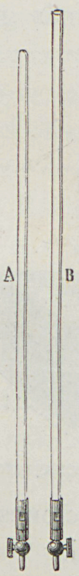


Fig. 316.—Leyes de Bernouilli sobre los sonidos armónicos de los tubos

Réstanos decir cuál es la sucesion de los sonidos armónicos en unos y otros, debiendo ántes advertir que Bernouilli fué quien descubrió las leyes que rigen los de los tubos abiertos ó cerrados.

Prodúcense estos sonidos poniendo sobre el fuelle acústico, representado en la figura 315, tubos cuya longitud es grande relativamente á las dimensiones trasversales (figura 316). Si se abre gradualmente la llave adaptada á cada uno de ellos, se oye primeramente el sonido fundamental y despues, sucesivamente, los armónicos.

Calificándolos por el órden del más grave al más agudo, á partir del fundamental, se ve que los números de vibraciones de los tubos abiertos crecen con arreglo á la serie de los números 1, 2, 3, 4, 5, 6..... etc. En los tubos cerrados estos números crecen segun la serie de los impares 1, 3, 5, 7..... etc., resultando de aquí que si se forman tres tubos, uno abierto de doble longitud que los otros dos, siendo uno de estos abierto y otro cerrado, los sonidos sucesivos del primero estarán representados por los números

1 2 3 4 5 6 7 8...

y los sonidos de los otros dos por las series:

Tubo abierto... 2 ... 4 ... 6 ... 8 ...
— cerrado 1 ... 3 ... 5 ... 7 ...

es decir, que los sonidos del tubo mayor abierto serán reproducidos alternativamente por los dos tubos de longitud mitad menor.

Terminemos el estudio de los fenómenos que presentan los tubos sonoros diciendo que las columnas gaseosas que vibran en el interior de estos instrumentos se dividen, como las cuerdas

vibrantes, en partes inmóviles ó nodos, y partes vibrantes ó vientres. La existencia de unos y otros se hace patente de varios modos. El más sencillo consiste en bajar con un hilo una membrana estirada al interior del tubo, examinando lo que le sucede á los granos de arena que se echa sobre ella. Estos granos saltan á impulso de las vibraciones, cuando la membrana llega á la altura de un vientre, como en toda la extension de la columna vibrante, quedando por el contrario inmóviles cuando la posicion de la membrana coincide con la de un nodo.

Por lo demás, la teoría ha resuelto completamente los problemas relativos á esta clase de fenómenos, y los experimentos de los físicos, un tanto ménos precisos de lo que exigiria el análisis matemática, á causa de las circunstancias complejas en que los efectúan, no son más que comprobaciones de las leyes deducidas por el análisis. Pero nosotros, que nos concretamos principalmente á describir los hechos curiosos de cada parte de la física, debemos ceñirnos á las nociones más indispensables para la inteligencia de estos hechos, y de las aplicaciones á

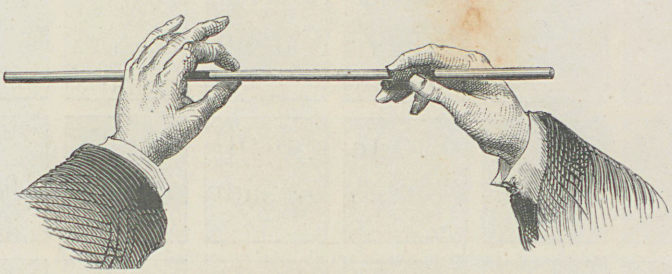


Fig. 317.—Vibraciones longitudinales de las varillas

la industria y á las artes que se ha sabido hacer de ellos.

III

VIBRACIONES SONORAS DE LAS VARILLAS Y PLACAS

Las *varillas sonoras* son vástagos cilíndricos de madera, metal, cristal ú otras materias elásticas, á las que se hace vibrar frotándolas longitudinalmente con un pedazo de paño mojado ó espolvoreado con colofonia (fig. 317); entónces despiden sonidos puros y continuos cuyo tono depende de la longitud de la varilla, cuando estas son de la misma sustancia. Tambien se pulsa con unas pinzas ó con los dedos la varilla cuyo sonido se desea estudiar, ya en su parte media ó ya en un punto determinado de su longitud. La varilla ha de estar por consiguiente libre en sus dos extremos ó solamente en uno de ellos. Pues bien, si se compara el sonido que despide la que sólo esté sujeta por una punta con el que emitiria la misma varilla ú otra de longitud igual y de la misma sustancia sujeta por su punto medio, se verá que el primero es más grave que el segundo, y las vibraciones de este dos veces más numerosas.

Si se hace vibrar varillas de longitudes diferentes, de seccion igual y de la misma sustancia, sujetas del mismo modo, la experiencia demuestra que los sonidos son tanto más agudos cuanto más cortas sean aquellas, variando el número de sus vibraciones en proporcion inversa de las longitudes. Así pues, las vibraciones de las varillas obedecen á las mismas

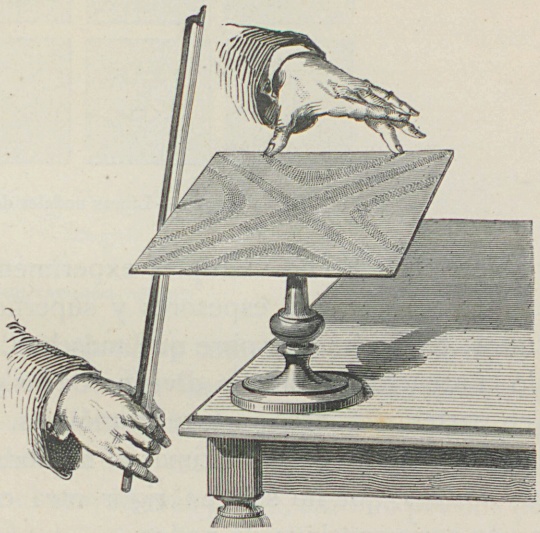


Fig. 318.—Vibracion de una placa

leyes que las de los tubos sonoros, notándose que si las que tienen sus dos extremos libres son asimilables á los tubos abiertos, las sujetas por un solo extremo lo son á los cerrados. Una misma varilla, lo propio que un tubo, emite, además del sonido grave fundamental, sonidos armónicos cuyas series ascendentes obedecen tambien á las mismas leyes que los de los tubos abiertos y cerrados.

Los fenómenos que resultan de las vibraciones sonoras en los cuerpos de varias formas son numerosísimos. Limitémonos á indicar los que ocurren en las placas y membranas.

Si se cortan algunas placas cuadradas, circulares ó poligonales reduciéndolas á hojas tenues de madera ó de metal bien homogéneo, y se las sujeta fuertemente á un pié por su centro de figura, se arranca de ellas sonidos sumamente variados frotando sus bordes con un arco, ó apoyando los dedos sobre uno ó varios puntos de su contorno (fig. 318). Chladni y Savart, cuyos nombres encontramos unidos á todas las investigaciones modernas que tienen el sonido

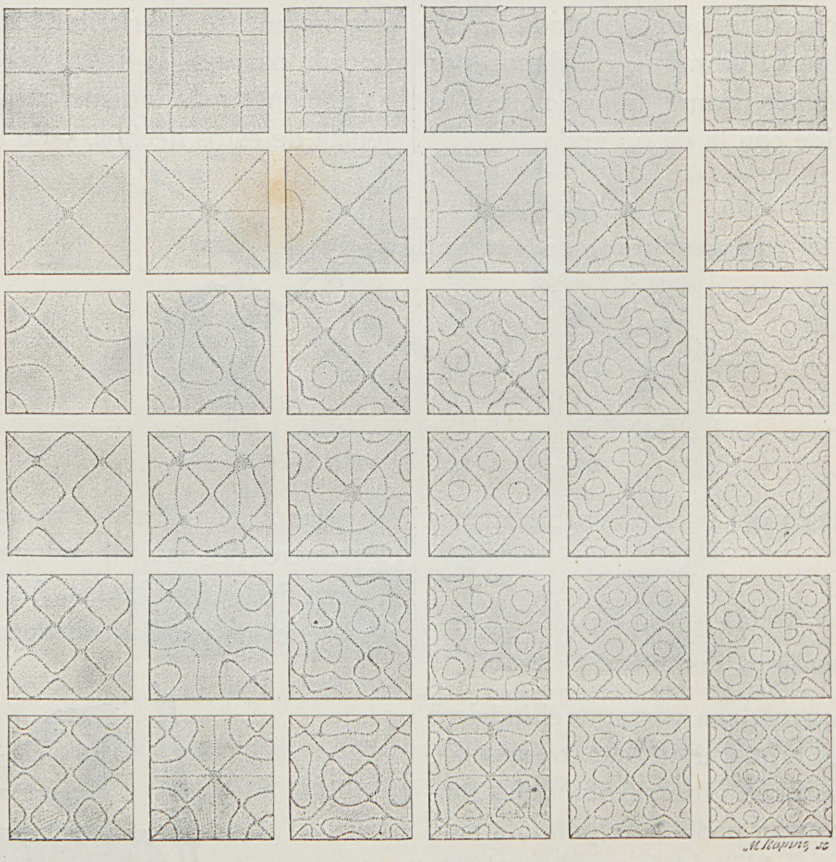


Fig. 319.—Líneas nodales de las placas vibrantes de forma cuadrada

por objeto, han hecho múltiples experimentos con placas de formas, espesores y superficies distintos. El fenómeno sobre que más han llamado la atencion ha sido la division de las placas en partes vibrantes y partes inmóviles, habiéndose aplicado á estas últimas el nombre de *líneas nodales*, que no son en rigor otra cosa sino una serie continua de nodos.

Para conocer y estudiar las posiciones y las formas de estas líneas, dichos físicos espolvoreaban la superficie de las hojas con arena seca y fina, observando que tan luégo como entraban en vibracion, las partículas de arena empezaban á moverse, huian de todas las partes vibrantes, se refugiaban á lo largo de las líneas nodales, trazando así todos sus contornos.

Son tan numerosas dichas líneas y tan complicadas á veces, y varían hasta tal punto en una misma placa con los diferentes sonidos que esta misma placa puede emitir, que Savart hubo de apelar á un procedimiento particular para recogerlos. En lugar de arena, valíase de polvo de girasol engomado, y con un papel húmedo adherido á la placa, obtenia la impresion de cada figura. En las 319 y 320 reproducimos una serie de líneas nodales obtenidas por Savart y por Chladni, advirtiendo que las figuras en que más numerosas son estas líneas corresponden á los sonidos más agudos, lo cual quiere decir que á medida que se eleva el sonido, disminuye la extension de las partes vibrantes.

En las placas cuadradas, las líneas nodales presentan dos direcciones principales, las unas paralelas á las diagonales y las otras paralelas á los lados de la placa (fig. 319).

En las circulares (fig. 320), las líneas nodales

están dispuestas á modo de radios ó de círculos concéntricos. Las campanas ó fanales de cristal, los timbres, las paredes sonoras se dividen asimismo en partes vibrantes y líneas nodales, como ya hemos visto en el experimento del vaso lleno de agua representado en la fig. 280. La 321 representa dos clases de vibracion de una campana y el modo cómo se divide en cuatro ó seis partes vibrantes, separadas por otros tantos nodos. Obtiénese la primera clase tocando la campana en dos puntos distantes entre sí un cuarto de círculo, en cuyo caso el arco se aplica á 45 grados de uno de los nodos. El sonido que resulta es el más grave, el fundamen-

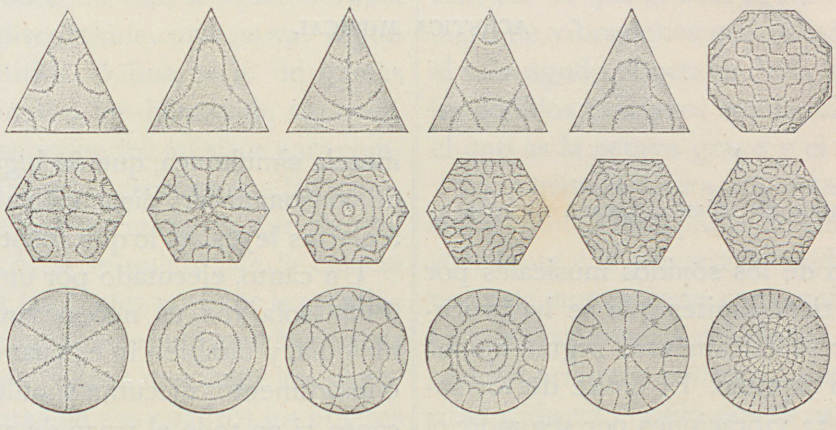


Fig. 320. —Líneas nodales de las placas circulares ó poligonales

tal de la campana. Se obtiene la otra clase de vibracion poniendo el arco en un punto distante 90 grados del nodo que se forma por el contacto del dedo. La campana se dividiria tambien en 8, 10, 12 partes vibrantes. Lo propio acontece con las membranas tesas sobre mar-

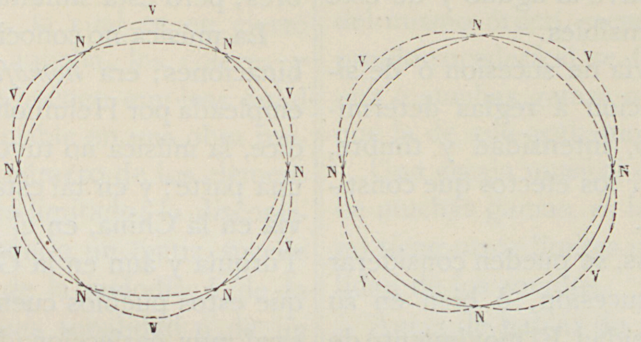


Fig. 321. —Nodos y vientres de una campana vibrante

cos, y que se hacen vibrar acercando á ellas otro cuerpo sonoro, por ejemplo, un timbre. Las vibraciones se comunican á la membrana por intermedio del aire, y la arena de que está cubierta traza líneas nodales.

Se ha reconocido que en el caso en que dos placas de la misma sustancia y de figura semejante, pero de espesores diferentes, den las mismas líneas nodales, los sonidos producidos varían con el espesor si su superficie es la misma, es decir, si el número de vibraciones es proporcional á los espesores. Si subsiste constante el espesor, el número de vibraciones está en razon inversa de las superficies.

Todavía no se conoce la ley con arreglo á la cual se suceden los sonidos producidos por una misma placa, cuando cambian las figuras formadas por las líneas nodales. Solamente se sabe que el sonido más grave, emitido por una placa cuadrada sujeta por su centro, resuena cuando las líneas nodales son dos paralelas á los lados que pasan por el centro, como se ve en el dibujo de la primera placa (arriba y á la derecha) de la figura 319. Cuando las dos líneas nodales forman las dos diagonales del cuadrado (segunda placa de la misma línea, fig. 320), el sonido es la quinta del primer sonido, del que puede llamarse fundamental.

CAPÍTULO VIII

ACÚSTICA MUSICAL

I

SONIDOS EMPLEADOS EN MÚSICA, ESCALA MUSICAL

La percepcion de los sonidos musicales por el oído humano tiene límites que se ha procurado determinar prácticamente, segun hemos dicho ya en otro capítulo. El límite de los sonidos graves es 32 vibraciones por segundo: el de los agudos llega hasta 73,000 (1). La escala de los sonidos está contenida á no dudarlo entre estos límites, de suerte que hay un sinnúmero de ellos de tono diferente, apreciable al oído y que pasan del grave al agudo y de éste á aquel por grados insensibles.

Combinándolos por vía de sucesion ó de simultaneidad y con sujecion á reglas determinadas de tiempo, tono, intensidad y timbre, logra el músico producir los efectos que constituyen una obra musical.

En toda obra de estas, se pueden considerar los sonidos, ya en su sucesion, ó bien en su combinacion ó simultaneidad. El movimiento de los sonidos sucesivos, con sus variaciones de tono, duracion y acentuacion ó ritmo, es lo que forma la *melodía*. La combinacion de aquellos, su mezcla simultánea, que da lugar á una sucesion de consonancias y disonancias ó acordes, sujetas á ciertas leyes, es lo que constituye la *armonía.*

Un canto, ejecutado por un solo instrumento ó una sola voz, es necesariamente una simple melodía, y tambien lo es cuando muchas voces ó instrumentos ejecutan simultáneamente dicho canto, si en todo el trozo de música están todos los ejecutantes al *unísono*. En este caso, la mezcla de los instrumentos y de las voces no cambia el carácter melódico de la pieza musical; cuando más, acrece sus fuerzas y varía sus timbres; pero esta simultaneidad no es armonía.

La música no conocia en su orígen otras combinaciones; era *homofona*, segun la expresion empleada por Helmholtz. «En todos los pueblos, dice, la música no tuvo en un principio más que una parte; y en tal estado la encontramos todavía en la China, en el Indostan, en Arabia, en Turquía y áun en la Grecia moderna, por más que estos pueblos cuenten con un sistema musical muy perfeccionado en ciertos puntos. La música de la antigua civilizacion griega, aparte quizás de algunos adornos, cadencias ó intermedios ejecutados por los instrumentos, era enteramente homofona; cuando más, las voces se acompañaban á la octava.»

En la Edad media fué cuando la asociacion de partes distintas en la música sagrada, asociacion al principio poco complicada, pero progresivamente más erudita, por decirlo así, dió orígen á la música armónica. La melodía, en un trozo musical, es en este caso la parte principal, formando su acompañamiento las secundarias; y con frecuencia la idea melódica pasa de una voz ó un instrumento á otra, y está tan mezclada con todas las partes concertantes que es difícil discernir el canto del acompañamiento, la melodía de la armonía.

---

(1) El sonido producido por 32 ó 33 vibraciones simples por segundo, es el más grave de los que dan los grandes órganos; corresponde al do_{-2}. En los instrumentos de orquesta, el contrabajo da el do_{-1}, ó sea 66 vibraciones simples. Los pianos actuales llegan desde el la_{-2} (55 vibraciones) al do_6 (8448). La nota más alta del flautin es el re_6 que da 9,504 vibraciones. Por último, los límites de la voz humana están comprendidos entre el fa_{-1} de los bajos profundos y el do_6 de los sopranos. Así pues, los sonidos verdaderamente usados en música se hallan comprendidos entre los límites 32 y 9,500 vibraciones, y áun así, los más graves lo propio que los más agudos de los que acabamos de indicar, producen solamente sensaciones muy poco gratas al oído, por lo cual se usan apénas. «Los sonidos más á propósito para la música, dice Helmholtz, y cuyo tono se puede apreciar con exactitud, están comprendidos entre 40 y 4,000 (80 y 8,000) vibraciones, en una extension de 7 octavas.» Despritz mandó fabricar á un constructor una serie de diapasones el más elevado de los cuales era el re_{10} ($do_1=128$): ejecutaba por consiguiente 73,700 vibraciones. Pero la audicion de esta nota extrema afectaba dolorosamente al oído, por traspasar considerablemente el límite de los verdaderos sonidos musicales.

Pero en todo caso, y ya se trate de sonidos musicales sucesivos ó bien simultáneos, hay entre los tonos de estos sonidos relaciones determinadas que limitan, entre dos intervalos cualesquiera, los tonos relativos de los sonidos empleados.

Considerados estos sonidos en su sucesion del grave al agudo ó de éste á aquel, forman pues una escala discontinua, una *gama*, segun la expresion admitida, ó una serie de gamas cuyo carácter comun ó ley hemos de exponer.

De esta serie se valen los músicos para componer sus melodías y los acordes que las acompañan, rigiéndose por ciertas leyes que son del dominio del arte ó, si se quiere, de la ciencia musical, pero con las cuales no tiene la acústica nada que ver. Se ha comparado muchas veces los sonidos con los colores que usan los pintores para representar en sus cuadros los objetos naturales, y en efecto, entre unos y otros media la analogía de que proceden por grados, pudiéndose hacer una gama de colores del mismo modo que la tenemos de sonidos. Sin embargo, hay una diferencia, y es, que tanto en la naturaleza como en la pintura, la cual es en cierto modo una imitacion de aquella, los colores y sus múltiples matices se pueden emplear en el mismo cuadro, cosa imposible en una obra musical, porque en esta el número de los elementos ó el de los sonidos es limitado; la discontinuidad es de rigor, y cuando un matiz sucede á otro para la variedad de la melodía ó de la armonía, el tránsito de una tonalidad ó de un modo á otro modo ó á otra tonalidad se efectúa por grados determinados y no de una manera continua.

Cuando hayamos dado algunas definiciones y planteado algunas reglas, comprenderán los lectores profanos en cuestion de música lo que tal vez les parezca oscuro en cuanto precede.

Empecemos por exponer la ley de sucesion y por indicar la relacion numérica de los sonidos que constituyen las escalas musicales conocidas con el nombre comun de *gamas* y que forman la base física de la música moderna (1).

II

LA GAMA

Dase el nombre de *gama* á una serie de siete sonidos que se suceden desde el grave al agudo ó del agudo al grave, y que están comprendidos entre dos sonidos extremos, cuyo carácter consiste en que el más agudo tiene doble número de vibraciones que el más grave. Siendo el más agudo el octavo de la serie, dícese que los sonidos extremos son la *octava* uno de otro: el uno es la octava grave y el otro la aguda.

Si partimos ahora de este octavo sonido, considerado como punto de partida de una serie semejante á la primera, y cuidamos de componer esta nueva serie con sonidos que tengan entre sí las mismas relaciones de altura ó tono que los primeros, observaremos que el efecto producido en el oído por su sucesion, presenta la mayor analogía con el que procede de la audicion de los sonidos de la primera gama. Una melodía formada por una sucesion de sonidos tomados de la primera serie, conserva el mismo carácter si se la toca ó canta con sonidos del mismo órden sacados de la segunda. Lo propio sucederá si se forma del mismo modo una ó muchas gamas más agudas ó más graves que la de que acabamos de hablar.

Una escala musical de este género, formada de muchas gamas, es indefinida ó por lo ménos no tiene otros límites sino los de la perceptibilidad de los sonidos.

Antes de hablar de los *intervalos* que separan los sonidos sucesivos de la gama, ó lo que es lo mismo, de las relaciones de los números de vibraciones que corresponden á cada uno de ellos, deberemos hacer observar que el sonido de que se parte para formar una gama es necesariamente arbitrario, de suerte que hay un número infinito de escalas musicales semejantes, puestas por la naturaleza á disposicion de los músicos. Mas en la práctica musical se ha sentido la necesidad de tomar convencionalmente un punto de partida fijo, lo cual ha inducido á dar á la gama nombres particulares. Si sólo se hubiera tratado del canto ó de la

(1) Desde los tiempos de Pitágoras hasta la Edad media y hasta el siglo XVII la gama ha sufrido modificaciones de composicion, denominaciones y forma, cuya historia seria demasiado larga y ajena al plan de esta obra. El conjunto de los sonidos que formaban la gama de los griegos comprendia veinte notas, ó dos octavas más una sexta mayor, notas que se designaban, exceptuando la primera, con las letras A B C D E F G *a b c d e f g aa bb cc dd ee*. Cuando Guido de Arezzo reformó en el siglo XI la escala musical hasta entónces usada, restableció una cuerda ó nota en el grave y la designó con la letra griega Γ, *gamma*, de donde tuvo orígen la palabra *gama* que se ha conservado hasta nuestros dias.

música ejecutada por la voz humana, no hubiera sido esto tan preciso; porque la voz es un órgano bastante flexible para emitir á beneplácito sonidos tan agudos ó tan graves como se quiera, entre sus límites naturales. Pero en la música moderna se emplean simultáneamente el canto y los sonidos musicales, y á menudo tambien, en las sinfonías y en la música concertante, los instrumentos son los únicos ejecutantes de una obra musical. Algunos de ellos están construidos de un modo á propósito para emitir sonidos fijos, de tono determinado, sirviendo así de reguladores de los sonidos emitidos por los demás instrumentos ó por las voces. De aquí ha resultado la necesidad de la adopcion de un sonido normal, de un tono determinado y constante, producido por un número conocido de vibraciones, con el cual se ha convenido en comparar todos los demás sonidos musicales, y que sirve, por decirlo así, de base á todas las gamas musicales. Bien entendido, pues, que este convenio es puramente arbitrario, y que el número de gamas naturales es ilimitado, ya no hay inconveniente alguno en adoptarlo, á lo ménos para la música instrumental.

Hé aquí los nombres (1) que se da á los diferentes sonidos que componen una gama ó escala, pasando del más grave al más agudo:

do re mi fa sol la si

Con arreglo á lo que hemos dicho acerca del modo cómo se forman las gamas más elevadas ó más graves, y de la analogía, cuando no de la identidad, que existe entre los sonidos de unas y otras, se comprende que ha habido que dar los mismos nombres á los sonidos de las gamas sucesivas. Los físicos los distinguen entre sí, poniendo á continuacion de los nombres de los sonidos, índices numéricos que marcan el órden de altura de las gamas. Así pues, las dos gamas, una inmediatamente más grave y otra más aguda que la que sirve de punto de partida, á la cual se da el índice 1 y á veces el 0, se escribirán así:

do_{-1}	re_{-1}	mi_{-1}	fa_{-1}	sol_{-1}	la_{-1}	si_{-1}
do_0	re_0	mi_0	fa_0	sol_0	la_0	si_0
do_1	re_1	mi_1	fa_1	sol_1	la_1	si_1
do_2	re_2	mi_2	fa_2	sol_2	la_2	si_2

Tambien resulta de la constitucion de las escalas sucesivas que los sonidos del mismo nombre están respectivamente á la octava, lo propio que los sonidos extremos de cada escala. Así do_0, re_0, mi_0, son las octavas agudas de do_{-1}, re_{-1}, mi_{-1}..... y las graves de do_1, re_1, mi_1.

Antes de pasar adelante, recordaremos las leyes de las vibraciones de las cuerdas y de los tubos, y comprenderemos que si se ha templado una serie de siete cuerdas de modo que se las haga emitir los siete sonidos de la gama, se obtendrá los mismos sonidos de la aguda, á la octava de la primera, dividiendo todas las cuerdas en dos partes iguales. Si en lugar de cuerdas, se tomaran siete tubos abiertos ó cerrados, cuyos sonidos fundamentales dieran la gama, seria menester tomar siete tubos de longitud mitad menor para obtener la gama inmediatamente más aguda, y siete tubos de doble longitud para la gama inmediatamente más grave.

Si se compara cada uno de los siete sonidos de una misma gama en el sonido más grave, con el que forma lo que se llama la nota *tónica*, relativamente á sus alturas, se tendrán otros tantos *intervalos* diferentes, cuyos nombres son los siguientes:

De do á do.	*unísono*
do á re.	*segunda*
do á mi.	*tercera*
do á fa.	*cuarta*
do á sol.	*quinta*
do á la.	*sexta*
do á si.	*séptima*
do á do_2.	*octava*

En física se define el intervalo musical diciendo que es la relacion de los números de

(1) En la nota de la pág. 327 hemos visto que los antiguos representaban las notas con letras, sistema adoptado todavía en Inglaterra y Alemania, en donde las siete notas de la escala son las letras C D E F G A B. En Italia, Francia, España, etc , se usan los nombres *do re mi fa sol la si*, cuyo orígen es el siguiente. Un monje benedictino, llamado Guido d'Arezzo y tambien el Aretino, escogió estas sílabas sacadas de un himno latino que se cantaba en las iglesias en honor de San Juan, y cuyas palabras son estas:

Ut queant laxis *re*sonare fibris
*Mi*ra gestorum *fa*muli tuorum,
*Sol*ve polluti *la*bii reatum,
Sancte Ioannes.

Pasó bastante tiempo sin que se hiciera uso más que de estas seis notas; la séptima, el *si*, no tenia ninguna denominacion: correspondia á la letra *b*, que unas veces se escribia bajo la forma de una *b cuadrada* y otras bajo la de una *b* redonda ó *mol*, segun que el trozo estaba en *ut* ó en *fa* mayor, teniendo aquí su orígen los nombres *becuadro* ó *bemol*, cuya explicacion veremos despues. En 1684 fué cuando el francés Lemaire dió el nombre de *si* á la séptima nota ó sensible del tono de do.

Nadie ignora que al solfear se sustituye la sílaba *ut*, que carece de sonoridad, por la sílaba *do*, que se oye mejor.

vibraciones de los sonidos que lo forman. El unísono y la octava son los únicos cuyo valor hemos dado; 1 ó $^{1}/_{1}$ mide el intervalo del unísono; 2 ó la octava. Réstanos decir cuáles son los números que representan los otros intervalos.

Hélos aquí, segun los ha adoptado hoy la mayoría de los físicos:

do — do	unísono	= 1
re — do	segunda	= $^{9}/_{8}$
mi — do	tercera	= $^{5}/_{4}$
fa — do	cuarta	= $^{4}/_{3}$
sol — do	quinta	= $^{3}/_{2}$
la — do	sexta	= $^{5}/_{3}$
si — do	sétima	= $^{15}/_{8}$
do_2 — do	octava	= 2

Con este cuadro es fácil calcular los intervalos consecutivos de los sonidos de la escala, ó las relaciones de los números de vibraciones de dos sonidos que se siguen en la serie. Hélos aquí:

do re mi fa sol la si do

$^{9}/_{8}$ $^{10}/_{9}$ $^{16}/_{15}$ $^{9}/_{8}$ $^{10}/_{9}$ $^{9}/_{8}$ $^{16}/_{15}$

Vese que estos intervalos no son iguales entre sí, pues los hay de tres órdenes de magnitud: tres intervalos, do-re, fa-sol, la-si, cada uno de ellos igual á $^{9}/_{8}$, son los mayores de todos; otros dos, re-mi, sol-la, valen $^{10}/_{9}$, de suerte que reduciéndolos á un denominador comun con los primeros, resulta 81 y 80 para los números enteros que los representarian respectivamente; aunque desiguales entre sí, se llaman en música *segundas mayores*, y los dos más pequeños $^{16}/_{15}$. *segundas menores*. Aun cuando las segundas mayores no sean iguales, se ha convenido en confundirlas con la misma denominacion (1), y se dice que la escala se compone de los intervalos sucesivos siguientes:

Una segunda mayor
Una segunda mayor
Una segunda menor
Una segunda mayor
Una segunda mayor
Una segunda mayor
Una segunda menor

La escala así formada se llama *gama mayor* para distinguirla de otra escala compuesta de intervalos que se suceden por otro órden, y que se llama *gama menor*.

La escala musical, formada de este modo, no es suficiente para el compositor, pues sus melodías, contenidas en muy reducidos límites, tendrian un carácter de monotonía incompatible con la variedad de las impresiones que desea producir. Para aumentar sus recursos, pasa en la misma pieza de una escala á otra, y á estas transiciones, cuyas reglas son de incumbencia del arte musical, se da el nombre de *modulaciones*. Las nuevas escalas no difieren completamente de la primera, ó sea de la que se ha convenido en llamar gama ó llave natural. Unicamente resultan modificados ciertos sonidos, pues por lo demás el órden de sucesion y las relaciones de tono de la nueva escala siguen siendo las mismas que en la primera.

Escribamos la sucesion de dos escalas consecutivas, á la octava una de otra, y teniendo el *do* por nota tónica:

do re mi fa sol la si do re mi fa sol la si do

Fácilmente se ve que con una simple sustitucion de los dos intervalos que separan el *mi* del *sol*, es decir, haciendo que siga al *mi* una segunda mayor y al *sol* una segunda menor, se tendrá una gama nueva que presente la misma serie de intervalos que la primera, pero empezando por la nota *sol* en lugar de empezar por el *do*. Para esto basta sustituir el *fa* con una nota más elevada, que se llama *fa sostenido* y que se escribe fa♯ (2). Hé aquí esta gama ó llave:

do re mi fa♯ *sol la si do re mi fa*♯ sol la si do

llave de *sol mayor*

Vese en efecto que los dos primeros intervalos de esta nueva llave son dos segundas

(1) Los físicos llaman *tono mayor* y *tono menor* á los dos intervalos $^{9}/_{8}$ y $^{10}/_{9}$, y dan el nombre de *semitono* á la segunda menor mi-fa, si-do.

(2) El tono de fa♯ deberia ser tal que la relacion del número de sus vibraciones con el de sol fuese la misma que con el de si comparado con el do, esto es, igual á la relacion de los números 15 y 16. Para esto se deberia multiplicar el fa=$^{4}/_{3}$ por la fraccion $^{135}/_{128}$, lo cual daria $^{45}/_{32}$. El intervalo del mi al fa♯ seria entonces $^{9}/_{8}$ tambien, como el del la al si en la llave de do mayor. Los físicos *sostienen* el fa multiplicándolo por $^{25}/_{24}$.

mayores sol-la, la-si, y que van seguidos de una segunda menor, si-do; que á continuacion vienen tres segundas mayores do-re, re-mi y mi-fa♯, y por último, que la escala queda terminada por una segunda menor fa♯-sol. El nuevo sonido habria debido recibir un nombre enteramente nuevo; se le distingue del *fa*, al que sustituye, con el nombre de *fa sostenido*. Partiendo de la llave de sol y sosteniendo el do, se tendria una nueva llave mayor empezando por *re* y así sucesivamente, lo cual pone á disposicion del músico siete llaves mayores, procediendo por sostenidos, es decir por la sustitucion progresiva de los sonidos primitivos por otros más elevados, ó por segundas mayores las segundas menores.

Se puede tambien obtener una serie de llaves mayores partiendo de la llave de *do*, para lo cual basta invertir el órden de los dos intervalos *la-si*, *si-do*, reemplazando el *si* por un sonido más bajo al cual se nombra *si bemol*, y se escribe *si* ♭ (1). Así se tiene la serie:

do re mi *fa sol la si*♭ *do re mi* fa sol la si♭ do

llave de *fa natural mayor*

Procediendo con esta llave nueva como en la primera se tendria una serie de llaves mayores, en las cuales un número cada vez mayor de los sonidos primitivos seria *bemolizado*.

Hé aquí el cuadro completo de las llaves mayores obtenidas mediante estos artificios:

LLAVE DE *DO* NATURAL MAYOR

TODAS LAS NOTAS DE ESTA LLAVE SON NATURALES

	Sostenidos		Bemoles
Llaves de sol	1	Llaves de fa	1
re	2	si ♭	2
la	3	mi ♭	3
mi	4	la ♭	4
si	5	re ♭	5
fa ♯	6	sol ♭	6
do ♯	7	do ♭	7

La serie de las notas sostenidas sucesivamente es la siguiente: fa, do, sol, re, la, mi, si. La de las notas bemolizadas es precisamente á la inversa: si, mi, la, re, sol, do, fa.

Como la exposicion completa de las reglas que sirven para formar todas estas escalas musicales seria ajena al plan de esta obra, nos limitaremos á decir que los músicos emplean tambien las *llaves menores*, con la particularidad de que el órden de los intervalos ascendentes difiere del de los descendentes.

LLAVE DE *LA* MENOR

Intervalos ascendentes		Intervalos descendentes	
la_1		la_2	
. . .	segunda mayor	. . .	segunda mayor
si		sol ♯	
. . .	segunda menor	. . .	segunda mayor
do		fa ♯	
. . .	segunda mayor	. . .	segunda menor
re		mi	
. . .	segunda mayor	. . .	segunda mayor
mi		re	
. . .	segunda mayor	. . .	segunda mayor
fa ♯		do	
. . .	segunda mayor	. . .	segunda menor
sol ♯		si	
. . .	segunda menor	. . .	segunda mayor
la_2		la_1	

En la llave menor que damos aquí por tipo se ve que las dos notas *fa* ♯ y *sol* ♯ de la escala ascendente están reemplazadas por las dos notas *fa*, *sol* en la descendente; esto es lo que los músicos indican simbolizando cada una de estas dos notas con el signo ♮, llamado *becuadro*, y que expresa la vuelta de las dos notas sostenidas á su estado primitivo ó natural. Usase tambien este signo para indicar un cambio análogo en una nota que estaba bemolizada.

La primera nota de una llave determina el tono de la pieza musical en que se emplea esta llave, por cuya razon recibe el nombre de *tónica*, diciéndose tono ó llave de do, tono de sol, etc. Los físicos y los músicos han empleado, en nuestro concepto con poco acierto, la palabra *tono* para designar los intervalos de segunda mayor y segunda menor, introduciendo así una confusion de vocablos que puede engendrar no menor confusion en las ideas.

(1) Para bemolizar el *si*, seria preciso multiplicar $\frac{15}{8}$ por $\frac{128}{135}$, y entónces el intervalo si♭-do, seria, como en la llave tipo de do mayor $\frac{15}{16}$, ó el de la sensible á la tónica. Los físicos bemolizan una nota multiplicándola por la relacion $\frac{24}{25}$. Nos concretamos á indicar estas diferencias, porque seria menester una larga exposicion y una discusion más larga aún para mostrar las razones que se alegan en pro y en contra de estos dos modos de concebir la constitucion de las llaves sucesivas.

Cuando se modula en el sistema de llaves que acabamos de exponer sucintamente, es decir, cuando se pasa de un tono á otro (de do mayor á sol por el cambio de fa en fa♯ ó á fa por el cambio de si en si♭, etc.), las notas de la nueva llave conservan los nombres que tenian en la primitiva, aunque en realidad difieren de ellas necesariamente. Esto no tiene inconveniente, en la música vocal ni áun en la instrumental, cuando no se trata de instrumentos de sonidos fijos, pues si el ejecutante posee buena voz y buen oído, sabe modificar como conviene las notas nuevas, á lo cual le obliga tambien el sentimiento de la tonalidad. Pero no sucede lo propio con los instrumentos de sonidos fijos. Como la diferencia entre los sonidos exactos y los falsos es muy pequeña, el oído se acostumbra á esta práctica forzosa.

Además, en teoría, los bemoles y los sostenidos de dos notas consecutivas, no son sonidos idénticos. Así, el re♭ difiere del do♯. Sin embargo los instrumentos de sonidos fijos, por ejemplo el piano, los identifican. La gama en estos instrumentos no es la gama ó llave natural.

Los músicos y con ellos los físicos admiten pues lo que se llama *escala atemperada*, en la cual proceden los sonidos de un sonido á su octava por grados iguales, confundiendo el sostenido de una nota con el bemol de la nota inmediatamente superior. Los números de vibraciones que les corresponden forman una progresion geométrica cuya razon es igual á $\sqrt[12]{2}$.

III

PRINCIPIOS CONSTITUTIVOS DE LA ESCALA: ESCALA DE LOS FÍSICOS Y ESCALA PITAGÓRICA

La historia de todas las trasformaciones que ha sufrido la escala desde Pitágoras hasta nuestros dias, es decir, en la antigüedad, en la Edad media y en los tiempos modernos, es demasiado complicada para que ni siquiera tratemos de dar aquí un resúmen de ella. Pero la circunstancia de que la serie musical ha variado, de que á los griegos les agradaban intervalos que nuestra música moderna reprueba, unido á la de que áun hoy mismo las escalas adoptadas por los pueblos que se llaman civilizados son muy diferentes de las que usa la música persa, china, japonesa y tártara, parece demostrar que el orígen de la escala es en gran parte convencional, y lo cierto es que no está basada absolutamente ni en leyes puramente físicas, ni en conveniencias puramente fisiológicas, sino que es el producto de una combinacion de ambas, modificada por los hábitos y la educacion del oído (1).

Largo tiempo se ha discutido y todavía se discute la cuestion del orígen de la escala, no habiendo aún llegado á un acuerdo ni los físicos ni los músicos. Los números que más arriba hemos dado para expresar los varios intervalos de las llaves mayor y menor, constituyen en su conjunto la escala ó *gama de los físicos;* pero hay otros que, sin diferir mucho de los primeros, forman una escala distinta, á la cual se da el nombre de *gama de los pitagóricos.*

Veamos en qué difieren y en qué se parecen estas dos series.

En nuestro concepto, la gama de los físicos no tiene más principio que este: dos sonidos forman una sucesion melódica ó un acorde agradable, cuando los números de sus vibraciones están en la relacion más sencilla posible. Representando la tónica ó primer grado de la escala por 1, se obtendrán los intervalos más agradables combinando 1 con los números simples 1, 2, 3, 4, 5... (es decir, con la sucesion de los armónicos del sonido fundamental): $^1/_1$ ó el unísono, $^2/_1$ ó la octava, $^3/_1$ la dozava, que, trasportada á la octava inferior, da la quinta, etcétera. Así resultaria constituida naturalmente la gama. Mas, aparte de que el principio formulado nos parece cuando ménos arbitrario, se deducen consecuencias que distan mucho de concordar entre sí y ménos aún con la práctica musical (2). Pero este no es el lugar de entrar en esta discusion. Limitémonos á comparar los dos sistemas de gamas.

(1) Tal es, ó poco ménos, la opinion de Helmholtz, el cual admite «que el sistema de las gamas, de los modos y de su encadenamiento armónico no se basa en leyes naturales invariables, sino que por el contrario es consecuencia de principios estéticos que han variado con el desarrollo progresivo de la humanidad y que variarán todavía.»

(2) El principio estético que considera la belleza ó el adorno, en arquitectura, en las demás artes y en música, como elementos enlazados con la sencillez de las relaciones numéricas, es el generalmente adoptado por los matemáticos y los físicos; pero jamás ha sido formalmente discutido, al ménos que sepamos, y por nuestra parte tendríamos muchas objeciones que hacerle. Para no citar más que un ejemplo ¿quién no ve que seria preciso considerar la octava como la consonancia más agradable (nada decimos del unísono que no es un acorde

El principio de la de los pitagóricos es el siguiente: siendo 2 y $^3/_2$ como en la primera, los números que representan la octava y la quinta, todos los intervalos se forman de estos procediendo por quintas sucesivas. Así la quinta de *sol* será $^3/_2 \times {}^3/_2$ ó $^9/_4$: es el *re*$_2$. Luego el *re*$_1$ está representado por $^9/_8$. Del *re* se pasa al *la* que es su quinta; despues al *mi* que es la quinta del *la*, y así sucesivamente. La gama que resulta de este modo de formacion difiere numéricamente de la de los físicos, como se juzgará por el cuadro siguiente:

Grados de la gama ó intervalos	Gama de los físicos	Gama de los pitagóricos
do$_1$ ó unísono.	1	1
re ó segunda mayor. . . .	$^9/_8$	$^9/_8$
mi ó tercera mayor.. . . .	$^5/_4$	$^{81}/_{64}$
fa ó cuarta.	$^4/_3$	$^4/_3$
sol ó quinta.	$^3/_2$	$^3/_2$
la ó sexta.	$^5/_3$	$^{27}/_{16}$
si ó sétima.	$^{15}/_8$	$^{243}/_{128}$
do$_2$ ú octava.	2	2

Como se ve, de ocho intervalos, cinco son idénticos en las dos gamas; los intervalos diferentes están representados por números ménos simples en la gama pitagórica, que, por otra parte, tiene la ventaja de proceder por series de segundas mayores y de segundas menores que son respectivamente iguales entre sí. Miéntras que la serie de los sonidos está representada en la gama de los físicos por los números

$$^9/_8 \quad ^{10}/_9 \quad ^{16}/_{15} \quad ^9/_8 \quad ^{10}/_9 \quad ^9/_8 \quad ^{16}/_{15}$$

en la gama pitagórica es mucho más regular:

$$^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^{256}/_{243} \quad ^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^9/_8 \quad ^{256}/_{243}$$

En todo caso, las diferencias son de poca monta; la relacion del *tono mayor* $^9/_8$ con el *tono menor* $^{10}/_9$ es igual á $^{81}/_{80}$. Es decir, que el exceso de tono del primer intervalo sobre el segundo, está marcado por el exceso de una sola vibracion sobre 80, dándose á este intervalo el nombre de *coma*. La misma diferencia existe entre los intervalos de la segunda menor $^{16}/_{15}$ en la gama de los físicos y de la segunda menor $^{256}/_{243}$ en la de los pitagóricos. Teóricamente, cada una de las escalas musicales así constituidas puede justificarse por ciertos conceptos y atacarse por otros. A nosotros no nos incumbe decidir la cuestion (2).

hablando con propiedad)? Luégo seguirian la quinta, la cuarta, la tercera mayor, etc.—Pues bien, ¿cuál es el músico á cuyos oídos no produzca la tercera mayor y áun la tercera menor un efecto más armonioso que la cuarta?

IV.

ESTUDIO ÓPTICO DE LOS SONIDOS Y DE LOS INTERVALOS MUSICALES

Hemos descrito varios métodos gracias á los cuales se puede contar el número de las vibraciones ejecutadas por un cuerpo sonoro en el momento de emitir un sonido determinado: la sirena, la rueda dentada, el vibroscopio ó fonautógrafo son los aparatos usados con tal objeto. En el último de estos instrumentos, las vibraciones mismas se inscriben en una superficie en la que se puede examinar fácilmente su amplitud y su número, constituyendo el método gráfico del estudio de los sonidos.

Hace diez y ocho años que al físico francés Lissajous se le ocurrió la idea de estudiar *de visu* los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros, sustituyendo el órgano del oído con el de la vista para apreciar las relaciones de los sonidos; de aquí procede el nombre de *método óptico* dado al procedimiento de que dicho físico se valió y que vamos á describir someramente. Con el método óptico, hasta un sordo puede hacer indagaciones sobre el tono comparado de los sonidos.

«Ninguno de nosotros, decia M. Lissajous en una leccion en la que exponia este nuevo método, habrá dejado cuando niño de meter una varita en el fuego para removerlo con ella y observar con la curiosidad natural en la edad juvenil esas líneas brillantes producidas por la punta abrasada como por un pincel mágico cuya huella fugaz se disipara en un momento. Tal es el experimento que ha servido de base para el método óptico.»

Nadie ignora que el diapason es un aparato que consiste en una varilla de acero encorvada á modo de herradura y sostenida en una

(2) Cornu y Mercadier, que han hecho con cuidado una larga serie de experimentos comparativos sobre estas dos escalas, han llegado á deducir que cada una de ellas tiene su razon de ser en la música moderna; la una, la pitagórica, la exigen los intervalos melódicos, al paso que en los armónicos es menester emplear la de los físicos. Pero ¿cómo conciliar esta doble exigencia, puesto que en la gran mayoría de las composiciones musicales modernas se hace tanto uso de la melodía como de la armonía?

columna cilíndrica que le sirve de pié (fig. 322). Con un cilindro de metal ó de madera más grueso que el espacio que media entre los extremos de sus dos brazos, se separan bruscamente estos y sus oscilaciones producen un sonido cuyo tono depende de la forma y dimensiones del instrumento; los físicos lo hacen



Fig. 322.—Diapason con su caja de resonancia

vibrar tambien frotando uno de los brazos con un arco. El diapason sirve para regular el tono de los instrumentos ó el de las voces en las orquestas y teatros; en Francia, el diapason normal es el que produce el segundo *la* del violin, que da 870 vibraciones simples por segundo.

Para hacer visibles las vibraciones de un diapason, M. Lissajous fija en la superficie convexa y en el extremo de uno de los brazos, un espejito metálico, y en el otro brazo un contrapeso para regularizar el movimiento vibratorio. «Miremos en ese espejo, dice, la imágen reflejada de una bujía colocada á algunos metros de distancia, y hagamos vibrar el diapason: al punto veremos que la imágen se alarga en el sentido de la longitud de los brazos. En tal momento hagamos que el diapason gire sobre su eje: la apariencia cambiará, y veremos en el espejo una línea brillante y sinuosa cuyas ondulaciones marcan por su forma misma la mayor ó menor amplitud del movimiento vibratorio.»

Sirviéndose de un segundo espejo M que proyecta la imágen en una pantalla E, se hace visible el fenómeno en toda la extension de una cátedra (fig. 323). Cuando el diapason vibra sin girar, la línea luminosa II' es vertical; pero no bien se le somete á los movimientos de rotacion, esta línea se trasforma en una curva, cada una de cuyas sinuosidades corresponde á una vibracion. En este caso, se recurre á un foco de luz más viva, como la del sol ó la eléctrica, y se la hace llegar al espejo del diapason por medio de una lente convergente L, haciendo además que el segundo espejo M dé vueltas alrededor de un eje vertical para obtener la trasformacion de la imágen rectilínea en una curva sinuosa.

Hasta aquí sólo se ha tratado de hacer visibles las vibraciones de un solo cuerpo sonoro. Veamos ahora cómo ha logrado M. Lissajous, valiéndose del mismo método, apreciar el tono comparativo de dos sonidos, medir la relacion de los números de vibraciones que á cada uno de ellos corresponden. Para ello se toman dos diapasones, ambos provistos de espejos (figura 324); mas, al paso que el eje de uno de ellos es vertical, el otro está situado horizontalmente y de modo que los dos espejos estén frente á frente. A poca distancia del diapason vertical se pone un quinqué rodeado de un tubo ó chimenea opaca con un agujerito por el que sale un rayo de luz que, dando en el primer espejo, va á reflejarse de él en el otro, que lo refleja á su vez en el eje de una lente, pudiendo el observador de esta manera seguir los movimientos de la imágen que se reduce á un punto, miéntras los dos diapasones estén en reposo.

Pero tan luégo como se hace vibrar el diapason vertical, el movimiento de vaiven de la imágen da, en lugar de un punto, una línea luminosa, prolongada en sentido vertical. Si, miéntras el diapason vertical está en reposo, se agita el horizontal, la imágen se alarga en el mismo sentido. Por último, si se hace vibrar á la vez los dos diapasones, la imágen resultará animada de dos movimientos simultáneos, uno en sentido horizontal y otro en sentido vertical,

y describirá una curva luminosa, cuya forma dependerá de la relacion que existe entre las duraciones de los dos sistemas de vibraciones, de la amplitud de las oscilaciones y por fin del espacio de tiempo que media entre el respectivo principio de dos vibraciones consecutivas ejecutadas por uno y otro diapason, constituyendo esta última duracion ó intervalo lo que se llama *diferencia de fase.*

M. Lissajous ha logrado representar de este modo las curvas luminosas dadas por diapasones acordados de modo que producen los intervalos de la escala, tal cual la adoptan los físicos. Si los dos diapasones suenan al *unísono*, sus números de vibraciones son entre sí como 1 es á 1: es decir, que las vibraciones efectuadas en tiempos iguales son tambien iguales en número. Si la diferencia de fase es nula, las vibraciones empiezan al mismo tiempo en los dos diapasones, resultando una línea recta luminosa oblicua, la diagonal de un rectángulo cuyos lados son de una longitud que varía con la amplitud de las vibraciones simultáneas. Esta línea recta se convierte en una elipse ú óvalo, cuando la diferencia de fase no es nula. La figura 325 presenta las curvas que dan las diferencias de fases iguales á 1/8, 1/4, 3/8 y 1/2.

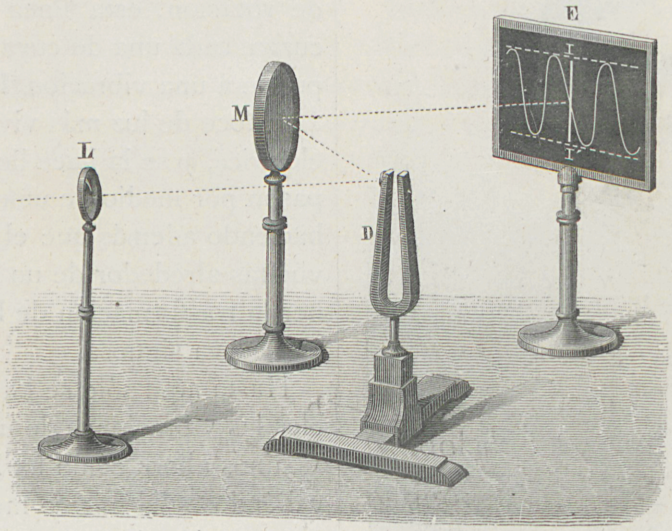


Fig. 323.—Método óptico de M. Lissajous: proyeccion de las vibraciones sonoras

Dos diapasones que resuenan á la *octava* uno de otro, dan una serie de curvas representadas en la figura 326, y que demuestran que uno de ellos ejecuta una vibracion en sentido horizontal, miéntras el otro verifica dos en el vertical. Si los números de vibraciones están en las relaciones 3 : 2, 4 : 3, 5 : 4, 5 : 3, 9 : 8 y 15 : 8, los diapasones están afinados á los intervalos de quinta, cuarta, sexta, segunda mayor y séptima. En la figura 326 se puede ver las curvas ópticas obtenidas en los casos de octava, cuarta y quinta, con las vibraciones de forma que proceden de las diferencias de fases. Examinando estas curvas, se puede contar el número de excursiones hechas por el punto luminoso en sentido vertical, y como unas y otras se efectúan al mismo tiempo, se tiene por esto mismo la relacion numérica de los dos sonidos.

Cuando los diapasones están rigurosamente acordes, la misma curva persiste en la pantalla miéntras dura su resonancia simultánea, y acaba por reducirse á un punto. Si por el contrario, el acorde no es del todo exacto, si por ejemplo, la octava no es perfecta, el efecto es el mismo que si hubiera un cambio continuo en la diferencia de fase, y la curva pasa insensiblemente por todas las formas indicadas en la figura. Una vez anotado el tiempo que invierte en completar el círculo entero de estas trasformaciones, dedúcese que hay una diferencia de una vibracion en el diapason grave, y de dos vibraciones en el agudo, relativamente al número que hubiera dado la octava justa.

Este método es de tal precision, que hasta la más leve diferencia queda marcada. Supongamos dos diapasones al unísono: la curva óptica será, segun la diferencia de fase, una de las representadas en la figura 325, y persistirá miéntras duren las vibraciones. Si se calienta ligeramente la rama de uno de los diapasones, resultará disminuido el sonido, alterado el uní-

sono, y al punto se verá en la pantalla la variacion de forma de la curva óptica que marca la cesacion del acorde.

Con el método óptico, no tan sólo se puede determinar las relaciones entre los números de vibraciones, sino tambien contar el número absoluto de las que corresponden á un sonido dado. Habiéndose construido así un diapason que da el *la* normal adoptado por las orquestas, ha sido fácil servirse en seguida de este tipo para construir diapasones que suenan al unísono. La figura 327 representa la disposicion del aparato empleado para esta comprobacion: el diapason normal está provisto de una lente objetiva *f;* un ocular *g* puesto encima forma con ella un microscopio, merced al cual se puede observar la imágen de una raya *m* trazada en el brazo del diapason D que se ha de compro-

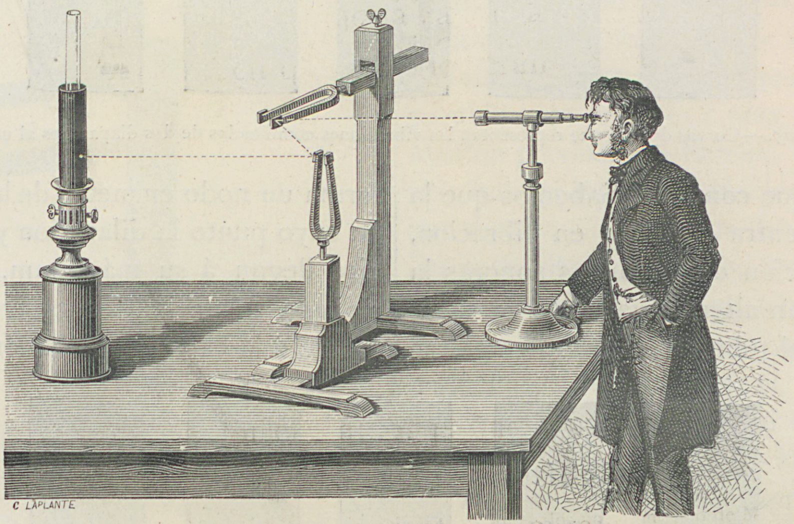


Fig. 324.—Estudio óptico de los movimientos vibratorios por el método de M. Lissajous

bar. Poniendo simultáneamente los dos diapasones en vibracion, se verá en seguida si están ó no al unísono, conforme acabamos de decirlo anteriormente.

M. Lissajous ha aplicado su método al estudio de las cuerdas vibrantes, y áun al de los sonidos propagados por el aire. Para ello, ilumina la cuerda en uno de sus puntos, dirigiendo sobre ella un haz luminoso delgado, y recibe los movimientos del aire en una membrana en cuya superficie fija una perlita brillante (1).

Olvidábasenos decir que si, en todos estos experimentos, las curvas trazadas por los puntos luminosos son visibles á la vez en todos sus puntos, consiste en que ha terminado una evolucion entera ántes de cesar la persistencia de la impresion luminosa en la retina: como la duracion de esta persistencia viene á ser de un décimo de segundo, esto supone que tal es el tiempo máximo invertido por la imágen del punto en recorrer la sinuosidad entera de la curva.

Tal es en resúmen el método original empleado por M. Lissajous para hacer visibles los movimientos vibratorios de los cuerpos sonoros y las particularidades más delicadas de estos movimientos. Vése por esta reseña que teníamos razon en decir que una persona privada de la facultad de oir podia comparar los sonidos con mayor precision de lo que podria hacerlo el oído más sensible con una sola audicion.

En estos últimos tiempos, M. Kœnig, sabio acústico de Paris, ha discurrido otro procedimiento no ménos ingenioso para estudiar las vibraciones de las columnas gaseosas en los tubos. Veamos en qué consiste.

Una de las paredes del tubo sonoro (fig. 328) lleva cierto número de orificios, tres por ejemplo, que corresponden al nodo del sonido fundamental y á los dos nodos de su octava; cada uno de ellos está cerrado por una cápsula de la cual sale un mechero que comunica con un tubo por el que llega á la cápsula y al mechero gas del alumbrado. La parte de la cápsula que está en el interior del tubo sonoro, en el seno de la columna gaseosa vibrante, es de cautchuc, y está ligeramente hinchada por el carburo de hidrógeno; por consiguiente, es eminentemente

(1) M. Wheatstone empleaba hacia mucho tiempo este modo de hacer visibles los movimientos vibratorios

elástica y cede al menor aumento de presion. Supongamos encendido el mechero: si la presion interior del aire del tubo aumenta, la membrana de cautchuc se comprime, de suerte que la capacidad de la cápsula disminuye y la llama se alarga; por el contrario, se acorta si, llegando á disminuir la presion, aumenta la capacidad interior de la cápsula. Como se ve, el mechero de gas es un verdadero manómetro indicador de los cambios de presion, por lo cual M. Kœnig ha dado á las llamas que se desprenden de las cápsulas el nombre de *manométricas*.

Supongamos ahora que el tubo sonoro está adaptado á un fuelle acústico y que se pone en



Fig. 325. — Curvas ópticas que representan las vibraciones combinadas de dos diapasones al unísono

vibracion el aire que contiene. Sabemos que la columna gaseosa entra entónces en vibracion, y que la propagacion de las ondas sonoras la condensan y dilatan alternativamente. Si el sonido emitido por el tubo es el fundamental, se forma un nodo en medio de la columna gaseosa, en cuyo punto la dilatacion y la compresion del aire llegan á su máximum. Estas concentraciones y dilataciones sucesivas se trasmiten entónces á la cápsula manométrica de en medio,

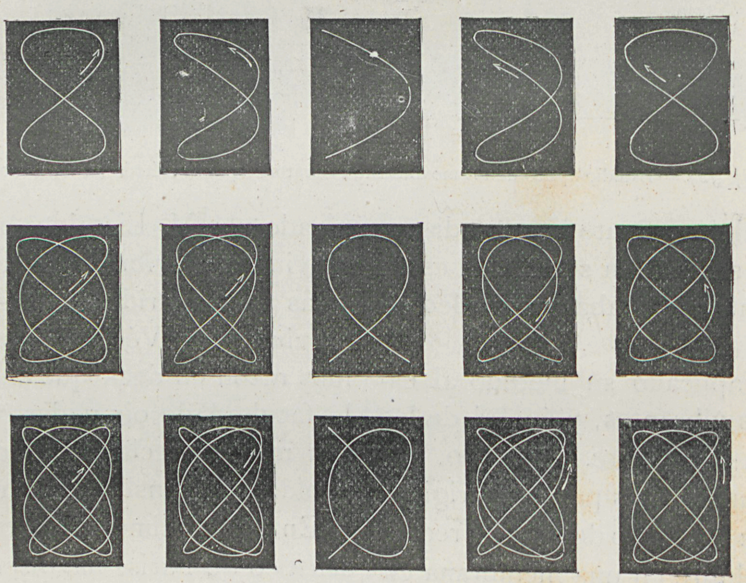


Fig. 326. — Curvas ópticas: la octava, la quinta y la cuarta

cuya llama se alarga y acorta alternativamente, ejecutando una serie de movimientos que marcan el estado vibratorio del cuerpo sonoro. Si se hace emitir al tubo la octava del sonido fundamental, habrá un vientre en frente de la cápsula de enmedio y un nodo en cada una de las otras dos, viéndose las llamas extremas sumamente agitadas, al paso que la central permanecerá inmóvil. Fácilmente se explican estos fenómenos.

En efecto, sabemos que la columna gaseosa vibrante en los tubos sonoros se divide en partes separadas por nodos, y cuyos puntos medios son vientres de vibracion. El aire está en reposo en cada nodo, pero su densidad es alternativamente máxima y mínima. Por el contrario, cada vientre es el punto en que la velocidad de conmocion es la mayor posible, al paso que la densidad del aire subsiste invariable en él. Pues bien, como las variaciones de densidad son las que determinan las de presion y estas se trasmiten á las llamas por las membranas de las cápsulas, resulta que las llamas manométricas están muy agitadas cuando se hallan en frente de los nodos, miéntras que están en reposo si corresponden á un vientre de la columna vi-

brante. Con el método de Kœnig se puede comprobar la existencia de estos tres estados; dando á las llamas una dimension escasa, las apaga la agitacion que experimentan en frente de los nodos, al paso que continúan encendidas en frente de los vientres.

Para hacer más perceptibles las prolongaciones y acortamientos de la llama, M. Kœnig se vale de un medio de proyeccion semejante

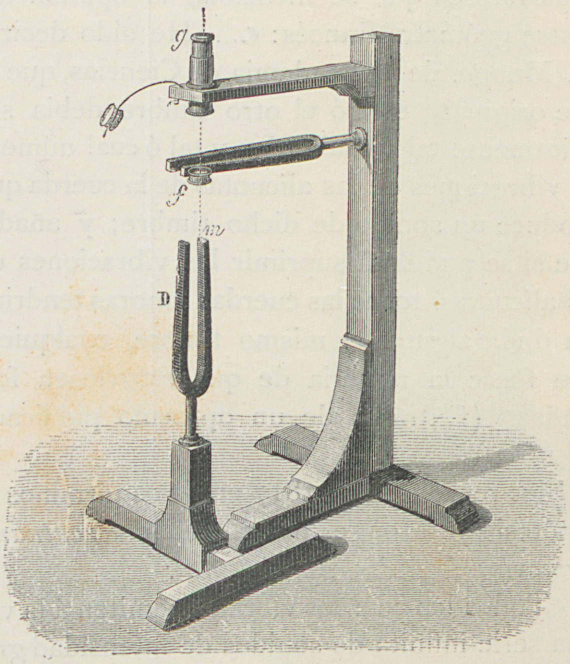


Fig. 327.—Aparato de M. Lissajous para completar los diapasones acordados al unísono del diapason normal

al adoptado por M. Lissajous para el método óptico. Coloca un espejo junto al mechero del que brota la llama, y le imprime un movimiento de rotacion con una rueda dentada de ángulo y un manubrio (fig. 329). Tan luégo como el tubo resuena, el espejo giratorio refleja una sucesion de llamas separadas por intervalos oscuros, ó una banda luminosa de bordes dentados. Poniendo una lente convergente entre el mechero y el espejo, se proyecta una imágen clara y brillante en una pantalla, en la cual se pueden estudiar entónces todas las particularidades del fenómeno.

Así pues, en los dos experimentos que hemos descrito más arriba y en los cuales el tubo emite sucesivamente el sonido fundamental y su octava, el cambio de tono de que se trata se manifiesta inmediatamente en las llamas manométricas, segun se representa en la figura 330, en que la serie superior marca el efecto producido por las vibraciones del sonido fundamental, y la inferior procede del sonido que es la octava aguda de este. El número de las llamas es doble en el segundo caso.

El mismo resultado se obtendria adaptando al fuelle dos tubos diferentes que resonaran el uno á la octava del otro; cada uno de ellos está provisto de una cápsula manométrica y las llamas reflejadas en el mismo espejo giratorio dan las dos series que representamos en la fig. 330.

M. Kœnig se vale tambien de otro método para comparar los tonos de los sonidos de tubos que resuenan á distintos intervalos. Hace pasar de una cápsula á otra el gas cuya combustion produce las llamas, pero no enciende más que un mechero. Haciendo entónces resonar simultáneamente los dos tubos, la misma llama resulta agitada por los dos sistemas de ondas sonoras, y se ve cómo se suceden en la pantalla llamas alternativamente grandes y pequeñas (figs. 331 y 332), cuyo número depende del intervalo musical de los sonidos.

«Esta disposicion, dice M. Kœnig, es preferible á la primera, siempre que la relacion entre los dos tubos no sea enteramente simple. Por ejemplo, para los tubos *do* y *mi* (tercera), es ya difícil la observacion de dos imágenes que corresponden á cinco; pero la sucesion de imágenes que se prolongan y se acortan por grupos de cinco, y que resultan en el espejo giratorio merced á la segunda disposicion (figura 332), no es de apariencia muy complicada.»

V

TIMBRE DE LOS SONIDOS MUSICALES

Hemos visto que una de las cualidades de todo sonido musical consiste en poderse distinguir los de un mismo tono y de igual intensidad. El *la* de un violin no tiene enteramente el mismo carácter que el *la* de una flauta ó de un piano, ó que el *la* emitido por la voz humana; más aún, en el mismo instrumento, no resuena un sonido del propio modo si cambia el modo de producirlo; así por ejemplo, el *la* dado por la cuerda de un violin que vibre en toda su longitud no es idéntico al *la* que se obtiene pisando con el cuarto dedo la cuerda del *re*. Por último, las voces humanas se distinguen entre sí, como cualquiera puede probarlo, áun cuando emitan sonidos de igual tono é intensidad.

A esta cualidad particular de los sonidos es á lo que se da el nombre de *timbre*.

Largo tiempo se ha tenido ideas vagas acerca de la causa de esta modificacion. Hé aquí lo que decia de ella Rousseau, en 1775, en la *Enciclopedia* (artículo SONIDO):

«Por lo que hace á la diferencia que se nota tambien entre los sonidos por el concepto del

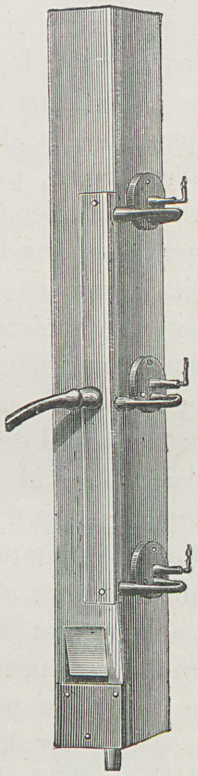


Fig. 328.—Tubo abierto de llamas manométricas

timbre, es evidente que no depende ni del grado de gravedad ni del de fuerza. Por más que un oboe se ponga exactamente al unísono de una flauta, áun cuando suavice el sonido en igual grado, el de la flauta tendrá siempre algo de blando y dulce y el del oboe algo de seco y agrio, que hará que jamás se les pueda confundir. ¿Qué diremos de los diferentes timbres de voz de la misma fuerza y de igual extension? Cualquiera puede juzgar de su prodigiosa variedad. Sin embargo, nadie, que yo sepa, ha examinado todavía esa parte que, lo mismo que las otras, tal vez tenga tambien sus dificultades; porque la cualidad del timbre no puede depender ni del número de vibraciones que forman el grado del grave al agudo, ni de la extension ó fuerza de estas mismas vibraciones que forman el grado del fuerte al suave. Preciso pues será buscar en los cuerpos sonoros una tercera modificacion diferente de ambas para explicar esta última propiedad, lo cual no me parece cosa fácil.»

De una comunicacion dirigida en 1875 á la Academia de Ciencias, resulta que Monge habia concebido, ya que no la teoría del timbre como los experimentos del físico aleman Helmholtz la han establecido recientemente, á lo ménos el principio en que está basada. Hé aquí el párrafo en que se menciona la opinion del ilustre geómetra francés: «..... He oido decir á M. Monge, de la Academia de Ciencias, que lo que originaba este ó el otro timbre debia ser únicamente tal ó cual órden y tal ó cual número de vibraciones de las alícuotas de la cuerda que produce un sonido de dicho timbre; y añadia que si se pudieran suprimir las vibraciones de las alícuotas, todas las cuerdas sonoras tendrian sin duda alguna el mismo timbre, cualquiera que fuese la materia de que estuviesen formadas.» (Extracto de un opúsculo publicado en 1793.)

Biot reprodujo en 1817 en otros términos la hipótesis de Monge, diciendo en su *Prontuario elemental de física experimental:*

«Todos los cuerpos vibrantes emiten á la vez una serie infinita de sonidos de intensidad gradualmente decreciente. Este fenómeno es parecido al de los sonidos armónicos de las cuerdas, pero la ley de la serie de los armónicos difiere segun las distintas formas de los cuerpos. ¿No será esta diferencia la que origina el carácter particular del sonido producido por cada forma de cuerpo, lo que se llama el *timbre*, y que hace, por ejemplo, que el sonido de una cuerda y el de un vaso no nos produzcan la misma sensacion? ¿No será tal vez la degradacion de intensidad de los armónicos de cada serie la que hace que nos parezcan agradables ciertos acordes que no soportaríamos si los produjesen sonidos iguales, y no procederá el timbre particular de cada sustancia, por ejemplo, de la madera ó del metal, del exceso de intensidad dada á tal ó cual armónico?» (1)

(1) La idea de que la causa del timbre reside en la concomitancia de sonidos débiles que acompañan al principal, idea perfectamente expresada por Monge y desarrollada luégo por Biot, ha persistido hasta los experimentos de Helmholtz. Así vemos que M. Daguin se expresa del modo siguiente en su *Tratado de física* publicado en 1855:

«En los instrumentos de música, el timbre suele tener por causa los sonidos débiles que acompañan al que se quiere producir solo. Ora

VI

LOS SONIDOS ARMÓNICOS Y EL TIMBRE

Varias veces hemos tenido ocasion de hablar de los sonidos armónicos y de definirlos. La nueva teoría del timbre exige que entremos en algunos detalles por este concepto.

Cuando se escucha con atencion el sonido producido por una cuerda vibrante, reconócese en breve que este sonido no es simple, pues aparte del fundamental, cuyo tono depende de la longitud, grueso y tension de la cuerda, el oído discierne con bastante facilidad cierto número de entonaciones más agudas, siquiera no-

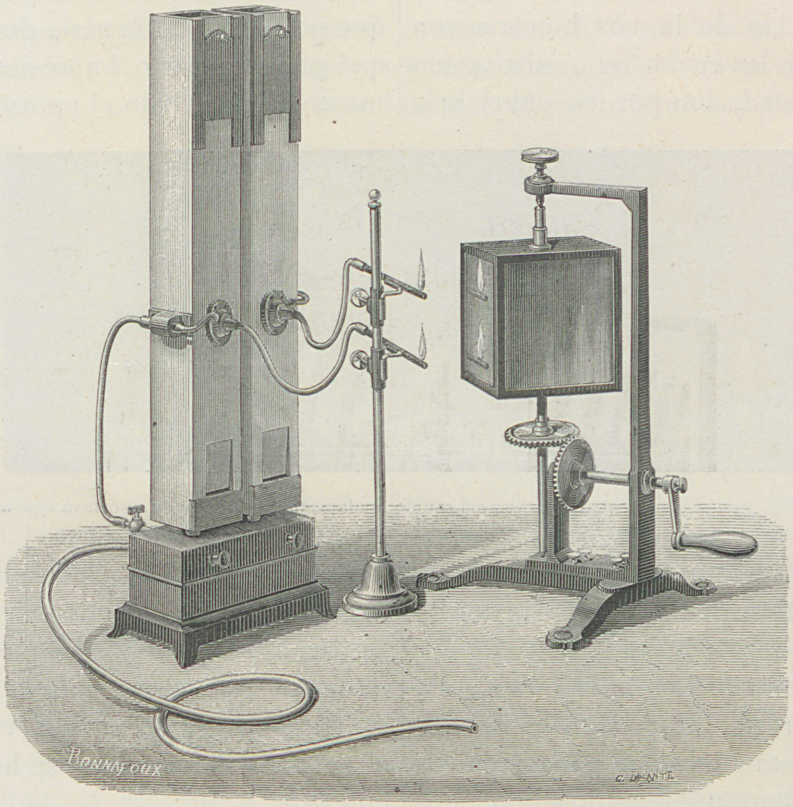


Fig. 329.—Aparato de M. Kœnig para la comparacion de los movimientos vibratorios de dos tubos sonoros

tablemente ménos intensas que el sonido fundamental. Supongamos que la cuerda agitada sea la más grave de un violoncelo; dará el sonido que los físicos acostumbran llamar *do*$_1$. Pero á la vez que resuena se oyen distintamente dos notas, la más grave de las cuales es el *sol*$_2$, es decir, la octava de la quinta ó la dozava del sonido fundamental; la otra es el *mi*$_3$, doble octava de la tercia mayor ó décimaséptima. La octava y la doble octava *do*$_2$ y *do*$_3$, se distinguen tambien, aunque no tan fácilmente, sin duda porque el carácter musical de estos sonidos se parece más al del fundamental, y porque se confunden con él.

Háse dado el nombre de *sonidos armónicos*, ó simplemente armónicos, á esos sonidos más débiles que acompañan á la mayor parte de los musicales, y cuyo primer estudio, hecho por el físico francés Sauveur, data del año 1700. Esta denominacion procede sin duda de que los primeros armónicos observados, y en especial los que acabamos de citar, forman entre sí y con el sonido fundamental acordes consonantes ó consonancias. Pero en breve se vió que no eran los únicos y que la serie de los armónicos es mucho más extensa.

Antes de indicarlos, comparemos entre sí los números de vibraciones del sonido fundamental y de sus armónicos. Representando el más grave por 1, la quinta es $^3/_2$ y por consiguiente la octava de la quinta es 3; la tercia

---

proceden estos sonidos concomitantes de las partes vibrantes mismas, que emiten así algunos sonidos á la vez; ora el cuerpo vibrante trasmite estas vibraciones á las demás partes del instrumento.... Tambien puede ser debido el timbre al modo cómo varía la velocidad de las partes del cuerpo vibrante, miéntras recorre la amplitud de cada vibracion. Las cuerdas que representan las ondas sonoras pueden ser de forma variable, y la onda dilatante diferente de la condensante, y áun puede suceder que haya interrupciones entre las ondas sucesivas.»

Así han ido precisándose poco á poco las ideas de los físicos sobre la causa hipotética del timbre; pero faltaba demostrar su realidad con hechos, con la observacion experimental, y este es el mérito que ha cabido á M. Helmholtz.

es $^5/_4$ y su doble octava 5; por último, la octava y la doble octava del sonido fundamental estarán representadas por los números 2 y 4 (1). De suerte que si se clasifican por órdenes de tono, del grave al agudo, todos los sonidos en cuestion, resulta la serie: 1, 2, 3, 4, 5.

Las cuerdas vibrantes no son las únicas que van acompañadas de armónicos; los sonidos de los tubos sonoros, los de la voz humana son ricos en ellos, todos los cuales no se distinguen con la misma facilidad, áun por los oídos más ejercitados; para reconocerlos se requieren medios particulares de análisis, de los que luégo hablaremos. Haremos notar solamente que entre los sonidos parciales que forman los compuestos, hay algunos que no son armónicos. Las varillas y las placas metálicas, las campanas de metal ó de vidrio y las membranas emiten, cuando se las hace resonar, sonidos parciales que no entran en la serie de los armónicos, y que por otra parte impresionan desagradablemente el oído, bajo el punto de vista musical.

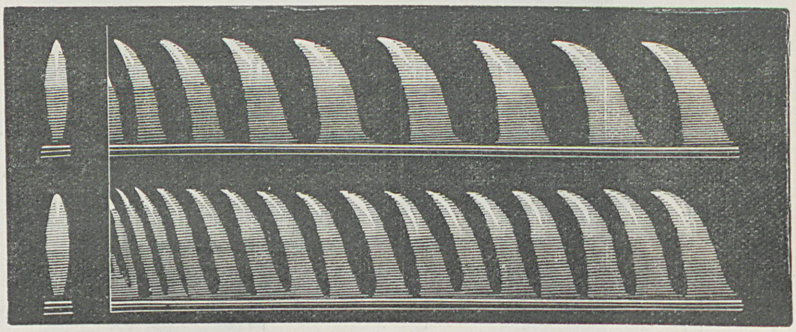


Fig. 330.—Llamas manométricas del sonido fundamental de un tubo y su octava aguda

¿Cuál es pues el carácter físico propio de los armónicos? ¿En qué se distinguen de los demás sonidos parciales que puede producir cualquier cuerpo sonoro? La definicion no es otra sino la generalizacion del resultado más arriba obtenido: un sonido fundamental tiene por armónicos todos los sonidos cuyos números de vibraciones son múltiplos del número de las vibraciones totales que miden su tono: y por tanto, están representados por la serie de los números enteros 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11, etc.; bien entendido, que esta serie está limitada por la perceptibilidad de los sonidos. Pero áun así y todo es mucho más extensa de lo que en un principio se creia.

Merced á un experimento tan sencillo como ingenioso, discurrido por Sauveur, se puede analizar los sonidos armónicos de una cuerda vibrante, aislándolos. Dicho experimento está basado en la ley que enlaza los números de vibraciones con las longitudes de las cuerdas, de donde resulta que los armónicos se obtienen dividiendo la cuerda dada en números enteros de partes iguales. Si cuando se pone la cuerda entera en vibracion produce los armónicos además del sonido fundamental, es que en realidad se divide en partes vibrantes; es, como dice Sauveur, que «cada mitad, cada tercio, cada cuarto de cuerda tiene sus vibraciones aparte, al paso que la vibracion se hace con la cuerda entera.»

Para reconocer la existencia de estas subdivisiones de la cuerda, basta apoyar levemente el dedo en el punto que es susceptible de dar el sonido armónico que se quiere obtener aisladamente; en la mitad ó en el cuarto de la cuerda, si se quiere obtener la primera ó la segunda octava; y en el tercio ó en el quinto, si la dozava ó la décimaséptima. Haciendo entónces vibrar la porcion más pequeña de la cuerda, se oye la nota deseada; las dos partes vibran al mismo tiempo, pero la mayor se subdivide, como fácilmente se prueba, colocando pequeños caballetes de papel en los nodos y en los vientres; estos últimos caen, quedando los otros solos. Segun se recordará, este es un experimento descrito ya en otro lugar.

Hemos dicho que era bastante difícil que el oído pudiese analizar los sonidos armónicos más allá de la dozava y de la décimaséptima. Véanse algunos detalles interesantes dados sobre este asunto por Helmholtz para facilitar á los obser-

(1) Esto es cierto con respecto á los intervalos de la gama de los físicos. La tercia de la gama pitagórica es $^{81}/_{64}$; su doble octava $^{81}/_{16}$ ó 5 $^1/_{16}$. Así pues, la gama de los físicos parece que debe ser preferida por este concepto.

vadores novicios los medios de distinguir estos sonidos: «Haré observar con este motivo, dice, que la educacion musical del oído no trae consigo más facilidad, más seguridad en la percepcion de los sonidos parciales. Aquí se trata más bien de cierta facultad de abstraccion del espíritu, de un predominio especial sobre la atencion de cada uno, más bien que de hábitos musicales. Sin embargo, el músico experto tiene aquí una ventaja esencial; la de representarse fácilmente los sonidos que procura oir, al paso que el profano ha de hacerlos resonar de continuo para tenerlos siempre presentes en la memoria. Hay que advertir desde luégo que por lo comun se oyen los sonidos parciales impares, es decir, las quintas, las tercias, las séptimas del sonido fundamental, más fácilmente que los sonidos parciales pares, que son las octavas del sonido fundamental ú otros armónicos, así como es más fácil distinguir en un acorde las quintas y las tercias que las octavas. El segundo sonido parcial, el cuarto y el octavo son octavas del

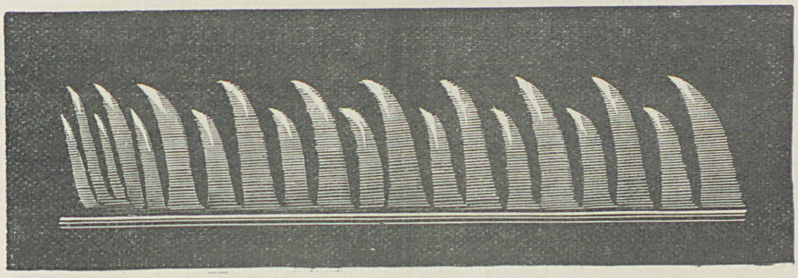


Fig. 331. —Llamas manométricas dadas simultáneamente por dos tubos en la octava

sonido fundamental; la sexta es la octava de la tercera, de la duodécima, necesitándose cierta práctica para distinguirlas. Los sonidos parciales impares más fáciles de distinguir son generalmente, por órden de intensidad, la tercia, es decir, la dozava del sonido fundamental ó la quinta de la octava superior; luégo la quinta ó la tercia; y por último, la séptima ó séptima menor, mucho más débil ya, de la segunda octava.

»Al principio, para observar los armónicos, conviene hacer resonar suavemente las notas que se desea oir ántes que el sonido que se va á analizar, conservándolas en lo posible un timbre idéntico al del conjunto. El piano y el armonium son muy á propósito para este género de indagaciones, porque ambos instrumentos dan armónicos de gran intensidad.»

El físico referido se ha ocupado mucho del análisis de los sonidos y en especial de los armónicos, habiendo basado en este análisis la teoría del timbre, que pronto resumiremos en sus puntos esenciales. Acerca de los armónicos de la voz, dice lo siguiente: «Es más fácil percibir los armónicos en el sonido de los instrumentos de cuerda, del armonium ó de los registros agudos del órgano que en el de los instrumentos de viento ó en el de la voz humana, pues estos no emiten tan fácilmente y de antemano, con leve intensidad, el armónico de que se trata conservándole al propio tiempo el mismo timbre. Esto no obstante, con algun ejercicio y por medio del sonido de un piano, se llega en breve á guiar el oído hácia el armónico que se necesita oir. Más difíciles relativamente de aislar son los sonidos parciales de la voz humana; sin embargo, Rameau pudo distinguir los armónicos de la voz, y esto sin ningun auxilio artificial. Se puede hacer el experimento del modo siguiente: hágase que una voz de bajo sostenga la nota mi_1 en la vocal O; y en seguida tóquese suavemente el si_3 del piano, tercer sonido parcial del mi_1, dejando que se extinga fijando la atencion en él. En la apariencia, el si_3 del piano se prolongará en lugar de extinguirse, aunque se deje la tecla, porque el oído pasa insensiblemente del sonido del piano al armónico correspondiente de la voz, tomándolo por la prolongacion de aquél. Pero una vez soltada la tecla y despues de caer el apagador sobre la cuerda, es imposible que esta continúe resonando. Si se quiere hacer la prueba con el quinto sonido parcial del mi_1, es decir, con el sol_3, es preferible que el cantante emita la vocal A.»

Por lo demás, el análisis de los armónicos de los sonidos se puede hacer más fácilmente con globos de vidrio llamados *resonadores*, de que

muy luégo trataremos. Con un crecido número de estos aparatos, cada uno de los cuales está construido á propósito para reforzar un sonido de determinado tono, se reconoce la presencia de sonidos parciales que acompañan á la nota fundamental de un cuerpo sonoro en vibracion, y se puede ver si pertenecen ó no á la serie de los sonidos armónicos. De este modo se notan sonidos sobrado tenues para que los perciba el oído más ejercitado ó más atento; y haciendo con cuidado repetidas pruebas de esta clase, se adquiere gran práctica y se acaba por advertir la existencia de dichos armónicos sin necesidad de aparato alguno.

Vamos á ver ahora cómo, teniendo en consideracion los armónicos de Helmholtz, se ha llegado á la teoría del timbre. Háse formulado desde luégo esta pregunta: ¿Todos los cuerpos sonoros dan armónicos? No. Tambien hay sonidos que son producto de un solo modo de vibracion, por lo cual se llaman *sonidos simples.* Vibrando un diapason en el orificio de un tubo

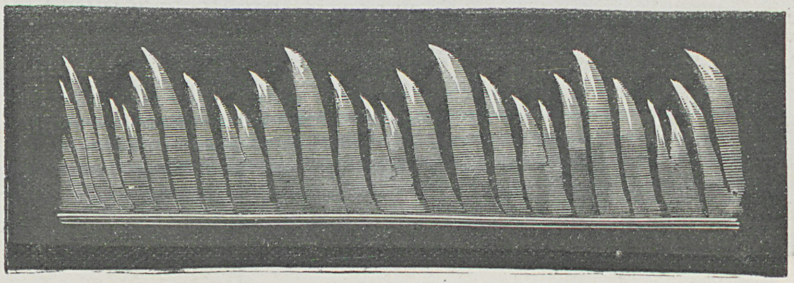


Fig. 332.—Llamas manométricas de dos tubos en tercera

sonoro se produce por ejemplo un sonido simple, sin mezcla; los de la flauta, el de la vocal *u* de la voz humana son sonidos compuestos, pero que por ser sus armónicos de escasa intensidad, se parecen mucho á los simples. Helmholtz ha observado, en primer lugar, que estos últimos sonidos difieren entre sí en intensidad ó tono, pero que no presentan diferencia apreciable de timbre. En cuanto á los sonidos compuestos de un sonido fundamental y de otros parciales pero no armónicos, su timbre procede, en concepto de dicho físico, del grado de persistencia y regularidad de los sonidos parciales; pero son poco agradables al oído y de poco uso en música; las placas metálicas, las campanas de vidrio ó metal, y las membranas dan sonidos de este género. Tenemos, pues, un primer punto establecido: los sonidos simples, privados de armónicos, no se distinguen entre sí por su timbre. Segundo punto: los sonidos compuestos, pero que no tienen verdaderos armónicos, poseen timbres muy diferentes, aunque sin carácter musical.

Quedan pues los sonidos musicales propiamente dichos, compuestos de un sonido fundamental y de otros parciales, armónicos del primero. Helmholtz ha demostrado, por lo que hace á dichos sonidos, que las diferencias de sus timbres dependen á la vez de la presencia de los sonidos armónicos superiores y de su intensidad relativa; pero en modo alguno de sus diferencias de fases. Hé aquí cómo se puede comprobar prácticamente la exactitud de esta teoría del timbre:

Para ello se hace uso de una serie de globos huecos de cobre, de varios tamaños, con dos aberturas de distinto diámetro, y construidos de modo que la masa de aire interior resuene en cada uno de ellos cuando se pone delante de la abertura mayor un cuerpo que emita un sonido determinado (fig. 333). Estos globos se llaman *resonadores*. Su propiedad consiste pues en reforzar, al poner en vibracion el aire que contienen, los mismos sonidos á cuyo acorde se los ha puesto.

Esto sentado, M. Kœnig ha construido un aparato formado de ocho resonadores acordados á la serie de los sonidos armónicos 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc., por ejemplo, á las notas do$_2$ do$_3$ sol$_3$ do$_4$ mi$_4$ sol$_4$, etc. En la figura 334 se ve que están fijados á un soporte uno sobre otro. Cada cual comunica por un tubo de goma que parte de la abertura menor con una cápsula manométrica; los mecheros de gas de estas cápsulas están alineados paralelamente á un espejo giratorio, pudiéndose ver fácilmente en la superficie de este espejo, por el estado de reposo ó agitacion de las llamas, cuáles son los resonadores

que entran en vibracion. Cuando se hace vibrar un cuerpo sonoro, un diapason por ejemplo, y se le pasa por delante de las aberturas de los resonadores, se refuerza el sonido tan luégo como pasa por delante del que emite el sonido del mismo tono, y la llama de este resonador aparecerá agitada en el espejo. Si se produce un sonido compuesto para estudiar sus armónicos y la intensidad relativa de estos, se pasará el cuerpo sonoro por delante de los orificios de los resonadores, y se verán ciertas llamas agitadas al paso que otras continuarán en reposo. En virtud de su mayor ó menor agitacion se podrá juzgar de la intensidad comparativa de los diferentes armónicos.

De este modo se podrá comprobar el hecho de que cualquier variacion en el timbre de un sonido de determinado tono resulta de la diferencia de los armónicos que lo componen y del predominio de alguno de estos sonidos secundarios.

Helmholtz ha aplicado este método al estudio de los sonidos emitidos por la voz humana; valiéndose de los resonadores ha demostrado la existencia de los armónicos, de los cuales, los seis ú ocho primeros son claramente perceptibles, si bien presentan variaciones de intensidad que dependen de las diversas posiciones de la boca, es decir, de las formas que toma la cavidad bucal segun la vocal que pronuncia. En una palabra, «el tono de los sonidos bucales de más fuerte resonancia depende solamente de la vocal para cuya emision se prepara la boca, y cambia de un modo bastante notable, áun para las leves modificaciones del timbre de la vocal, como se observa en los diferentes dialectos de una misma lengua. En cambio, los sonidos propios de la cavidad de la boca son casi independientes de la edad y del sexo.» Cada vocal tiene pues un timbre especial que resulta del predominio de un sonido armónico particular y de tono absoluto, de suerte que, por este concepto, la voz humana emite sonidos que se distinguen esencialmente de los emitidos por los instrumentos de música.

Así pues, la vocal A tiene por sonido específico ó característico el *si bemol*. Cuando pronunciamos el sonido A, á cualquier tono, el sonido predominante ó de más fuerte resonancia de la cavidad bucal es el *si bemol*$_4$, para la vocal O es el *si* $\flat_5$. Las vocales E, I presentan dos sonidos de resonancia, uno agudo y otro grave.

Por lo demás, véase un método muy sencillo para comprobar el timbre de las vocales.

El observador deberá coger un diapason que dé el si bemol, poniéndosele delante de la boca miéntras vibra; en seguida pronunciará en voz tan baja que ni él mismo se oiga las dos vocales A O, muchas veces y sucesivamente repetidas, y notará que el sonido del diapason se refuerza siempre que la boca hace el movimiento propio de la A, al paso que el de la O no lo altera. Ocurriria el mismo fenómeno con dos

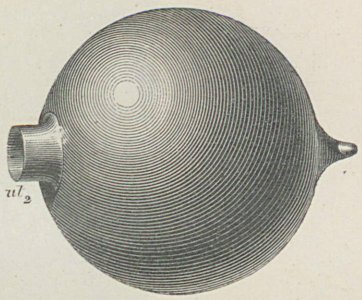


Fig. 333. — Resonador de Helmholtz

vocales cualesquiera si se hiciera uso de un diapason que estuviese al unísono con el armónico predominante de una de ellas.

Tal es la serie de fenómenos, no explicados hasta el presente, cuya produccion está relacionada con las leyes conocidas de las vibraciones de los cuerpos sonoros.

VII

INTERFERENCIAS SONORAS

Supongamos que dos conmociones sonoras, emanadas de dos focos diferentes, se propagan en el mismo medio elástico, por ejemplo, en el aire. Las vibraciones ú ondas sonoras que resultan de aquellas, coexistirán generalmente en el medio; es decir, que en cada punto y á cada instante habrá superposicion de los leves movimientos que constituyen estas vibraciones. Se efectuarán las condensaciones y dilataciones sucesivas, ora agregándose, ora segregándose con arreglo á las leyes de la mecánica. Si los dos sonidos llegan á tener la misma longitud de ondulacion ó el mismo tono y tambien igual intensidad, podrá suceder que se destruyan; para lo cual bastará que las dos ondas tengan

fases opuestas, que la semi-onda condensante del uno coincida exactamente con la dilatante del otro. Al destruirse los dos movimientos, el medio elástico quedará en reposo en todos los puntos en que ocurra dicha destruccion, y para un observador situado precisamente en este punto resultará el silencio. Tenemos pues establecida teóricamente esta paradoja de la acústica: *un sonido agregado á otro puede dar por resultado el silencio.*

El fenómeno de destruccion ó anulacion del movimiento sonoro, cuya posibilidad teórica acabamos de demostrar, es lo que se llama *interferencia*, por analogía con los fenómenos de interferencia luminosa.

En la figura 335 se ven gráficamente representados varios casos de interferencia sonora. Las ondas *aaa...*, *bbb...*, se agregan unas á otras y producen la onda resultante AAA. Las ondas *aaa...*, $a_1 a_1 a_1$ se componen dando por onda

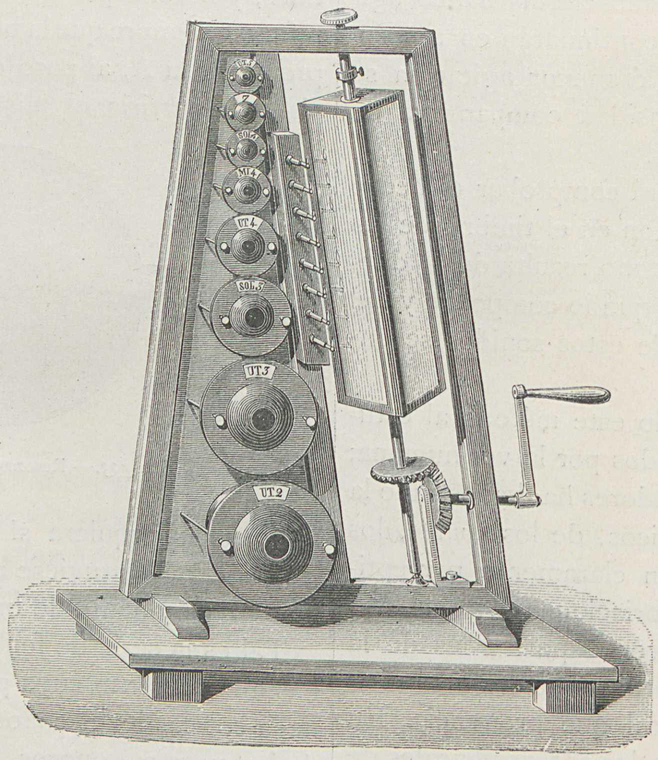


Fig. 334.—Aparato de M. Kœnig para el análisis de los timbres de los sonidos musicales

resultante la $\alpha\alpha\alpha$..; por último, las ondas opuestas *aaa... bbb...* se destruyen en todos sus puntos y la onda resultante será nula, habiendo interferencia completa de sonidos.

Esto por lo que respecta á la teoría. Réstanos demostrar cómo se pueden realizar prácticamente estas consecuencias singulares de los principios de la acústica. Wheatstone se valió, para probar la interferencia del sonido, de un tubo sonoro de dos brazos bifurcados en forma de Y; poniendo sus aberturas sobre una placa vibrante que hacia resonar, obtenia á beneplácito, ó un refuerzo del sonido producido, ó el silencio del tubo. Habia refuerzo, es decir, entrada en vibracion de la columna de aire del tubo, cuando las dos aberturas correspondian con dos vientres alternos de la placa que tuvieran movimientos del mismo sentido; el tubo permanecia silencioso, si se colocaba á las dos aberturas enfrente de dos vientres consecutivos ó dotados de movimientos de sentido contrario.

El sabio físico inglés hacia otro experimento no ménos concluyente con un aparato en el que los dos tubos, situados paralelamente, estaban enlazados por otro tubo puesto en ángulo recto con ellos; en los extremos de los tubos laterales habia dos aberturas situadas frente á frente, si los tubos eran paralelos entre sí. En esta posicion, se interponia entre ellos una placa sonora poniéndola en vibracion, con lo cual la abertura de cada tubo se hallaba delante de una misma region de la placa, aunque una á un lado y otra á otro lado de ella, de suerte que los movimientos vibratorios comunicados á la columna de aire de uno de los tubos eran exactamente opuestos á los que recibia la columna del otro. Propagán-

dose ambas ondas en el mismo instante en sentido inverso, se destruian, oyéndose solamente el sonido de la placa. Pero si entónces se hacia girar uno de los tubos, de modo que una sola de dichas aberturas resultara en frente de la superficie vibrante, la interferencia cesaba, el tubo entraba en vibracion, y al punto se oia el refuerzo del sonido de la placa.

Tomemos ahora de Helmholtz otros dos ejemplos en los que ocurre el fenómeno de la interferencia, esto es, en que el sonido destruye al sonido:

«Figurémonos, dice, dos tubos ó cañones de órgano exactamente semejantes, acordados al unísono, y montados en el mismo secreto, muy cerca uno de otro. Cada uno de ellos, herido separadamente por el aire, da un sonido intenso; pero si se hace llegar el viento á ambos á la vez, el movimiento del aire se modifica de tal modo que la corriente entra en uno de los

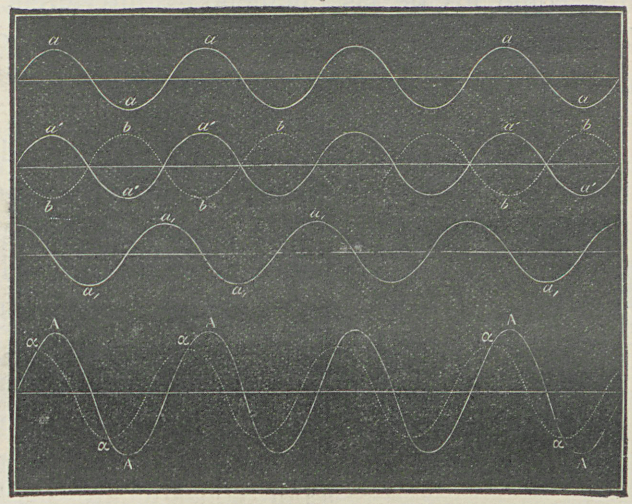


Fig. 335. — Interferencia de las ondas sonoras

tubos miéntras sale del otro; así es que no llega sonido alguno al oído de un observador distante, y sólo percibe entónces el sonido del aire.

»El diapason presenta tambien fenómenos de interferencia que dimanan de que sus dos brazos ejecutan sus movimientos en sentidos contrarios (fig. 336). Si al golpear un diapason lo acercamos al oído haciéndolo girar sobre su eje, se ve que hay cuatro regiones en que se percibe distintamente el sonido, que, en las cuatro regiones intermedias, es imperceptible. Las cuatro primeras *(abcd)* son aquellas en que uno de los dos brazos, ó bien uno de los dos planos laterales del diapason, se presentan de frente al oído. Las otras están situadas en posiciones intermedias, casi en planos *(mn, mn)* trazados por el eje del diapason á 45° sobre los planos de los brazos.» En este último caso, la interferencia ocurre en todos los puntos en que se anulan los movimientos en sentido contrario de los dos brazos del diapason que actúan á la vez sobre las mismas regiones del aire ambiente. La reunion de estos puntos en un mismo plano perpendicular á los brazos da una hipérbola equilátera.

¿No deberán atribuirse á interferencias las desigualdades de intensidad que se notan al voltear una campana (1)? Tan pronto llega la onda al oído con toda su fuerza, como aparece anulada, de donde resultan esas alternativas singulares que hacen creer que la campana se acerca ó se aleja. Cualquiera que sea el modo de division del cuerpo sonoro en partes vibrantes y en líneas nodales, sucede sin duda que las partes diametralmente opuestas actúan simultáneamente sobre el aire en sentido contrario, como los brazos de un diapason, pareciéndonos muy plausible que las variaciones de intensidad del sonido en el último caso convengan tambien con el que acabamos de citar. Hay que agregar que, como el badajo de la campana no siempre da rigurosamente en los mismos puntos, debe

(1) Tal es la opinion de Tyndall, que atribuye las intermitencias de que tratamos á la falta de simetría de la campana: «Esta, dice, vibra más rápidamente en una direccion que en otra, y la coexistencia de estas dos series en vibracion de períodos diferentes, produce necesariamente pulsaciones.» (El Sonido.)

resultar una desviacion de los vientres y líneas nodales de aquella.

VIII

PULSACIONES Y SONIDOS RESULTANTES

Para que dos ondas puedan destruirse con su interferencia, es preciso que los sonidos que concurren estén exactamente al unísono y tengan la misma intensidad. Cuando no se ha llenado la primera condicion, el concurso de los dos sonidos produce tambien en ciertos casos, fenómenos muy interesantes, como los de las *pulsaciones* y de los *sonidos resultantes*.

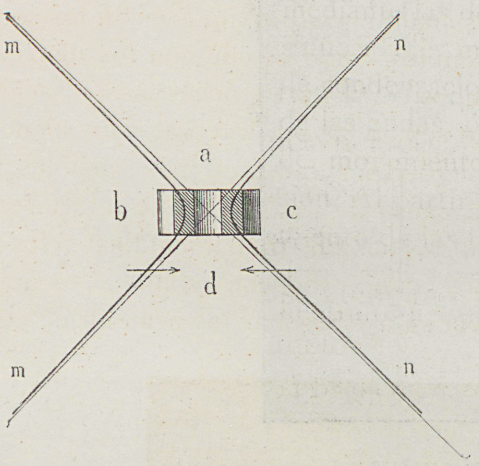


Fig. 336.—Interferencia de un diapason

Sauveur hizo el descubrimiento, ó, si se quiere, el primer estudio científico de las pulsaciones.

Cuando dos sonidos que no difieren mucho de tono resuenan simultáneamente, percibe el oído, además de la impresion particular de la disonancia que resulta de su simultaneidad, refuerzos y atenuaciones periódicas. A estos refuerzos del sonido se les da el nombre de *pulsaciones*. La experiencia y el cálculo concuerdan para demostrar que el número de pulsaciones en un tiempo dado, depende de la altura absoluta de los dos sonidos á la vez que de su intervalo; más claro, el número de pulsaciones es igual á la diferencia de los números de vibraciones completas que los dos sonidos ejecutan en el tiempo marcado.

Citemos uno ó dos ejemplos. Consideremos el do grave del violoncelo, que efectúa 128 vibraciones por segundo, y hagamos resonar al mismo tiempo el sonido, un poco inferior al do sostenido, que produce 133 vibraciones. Las pulsaciones serán 5 por segundo. Si el intervalo fuese mayor, por ejemplo el del mismo do al re, el número de pulsaciones, igual á la diferencia entre los números 128 y 144, seria igual á 16 por segundo. En la octava superior seria doble ó igual á 32; en la inferior quedaria reducido á 8. Si los dos sonidos estuviesen tan inmediatos que sólo hubiera una unidad de diferencia entre los números de vibraciones que aisladamente efectúan, no habria más que una pulsacion por segundo.

Las pulsaciones no son otra cosa sino un fenómeno de interferencia, como fácilmente se comprende. Sean dos ondas sonoras de períodos poco diferentes, una de las cuales efectúa 8 vibraciones completas, al paso que la otra, que corresponde á un sonido más elevado, efectúa 9 en el mismo tiempo. Se las podrá representar mediante las dos curvas de la figura 337, cuyas sinuosidades marcan el estado de dilatacion ó de condensacion del aire en el trayecto comun de las ondas, ó lo que es lo mismo, el estado del movimiento molecular debido á su trasmision. Al partir de un punto en que el movimiento de las dos ondas es opuesto y en que por consiguiente sus efectos se destruyen ó neutralizan, se ve que se separan poco á poco; á las cuatro y media vibraciones efectuadas por la primera, la segunda habrá efectuado solamente cuatro; desde este momento las fases, en lugar de ser opuestas, serán idénticas; los efectos de las ondas concurrirán, y por consiguiente su amplitud; la intensidad del sonido llegará á un máximum que decrecerá en seguida en toda la mitad inversa del período comun. Así pues, á cada período de 9 vibraciones del primer sonido y de 8 del segundo, habrá una atenuacion y un refuerzo, y así sucesivamente. Por tanto, si en el curso de un segundo, el número total de los períodos semejantes es 16, es decir, si el primer sonido, el más grave, verifica 128 vibraciones completas, al paso que el otro efectúa 144, el número de refuerzos del sonido ó de pulsaciones será 16, conforme lo da á conocer la ley ántes enunciada.

Las pulsaciones se pueden hacer visibles merced al empleo de los métodos ópticos ó gráficos que sirven para inscribir los movimientos vibratorios. El fonautógrafo de Scott ya descrito (fig. 298) es un aparato que llena muy bien este objeto. Recordemos que es una

paraboloide de revolucion cortada en su foco, en el cual se extiende una membrana que vibra por efecto de las ondulaciones que recibe la superficie interior de la paraboloide, reflejándolas. Un estilete muy sutil, fijo á la membrana, traza en un cilindro giratorio una curva sinuosa que representa las vibraciones aéreas trasmitidas. Tales son las curvas de la figura 338. La una representa las pulsaciones de dos sonidos cuyo intervalo es el de una nota á esta misma nota sostenida; la otra, las que proceden del concurso de dos sonidos que tan sólo distan una coma. En dichas curvas se ven perfectamente marcados los períodos de refuerzo ó de atenuacion del sonido.

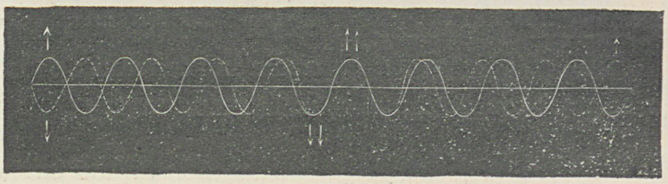


Fig. 337. — Curva representativa de dos sonidos que dan pulsaciones

Consíguese el mismo resultado con el método óptico de M. Lissajous, ó con las llamas manométricas y los espejos giratorios de Kœnig.

Hemos dicho que las pulsaciones resultan sobre todo cuando los sonidos emitidos son casi del mismo tono. Pero son tanto más sensibles cuanto más próximos están los sonidos á ser simples, como sucede con los diapasones y los tubos cerrados; entónces las pulsaciones se hallan separadas por intervalos de silencio casi completo y por lo mismo más sensibles. Cuando, á causa de fenómenos de interferencia se anulan los sonidos fundamentales en los instrumentos que producen sonidos compuestos, todavía se oye resonar los armónicos, que á su vez dan orígen á las pulsaciones. Hay un medio cómodo de obtener pulsaciones muy distintas, el cual consiste en servirse de dos tubos cerrados al unísono; tan luégo como estos hablan, se acerca el dedo á la embocadura de uno de ellos, lo cual produce una ligera atenuacion en el tono del sonido, y al punto se perciben las pulsaciones. Acabamos de ver que los armónicos las producen tambien. He aquí lo que acerca de esto dice Helmholtz:

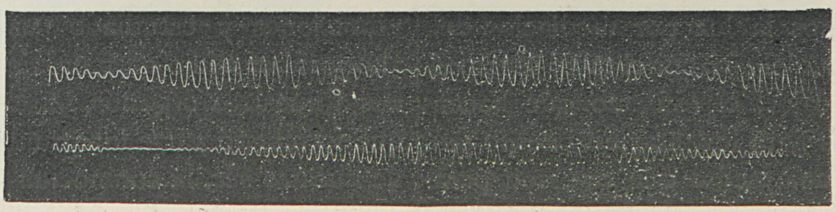


Fig. 338. — Pulsaciones producidas por dos sonidos cuyo intervalo es: 1.°, de una segunda menor; 2.°, de una coma

«Cuando dos sonidos complejos ejecutan pulsaciones, los armónicos las producen tambien; á cada pulsacion del sonido fundamental corresponden dos del segundo sonido elemental, tres del tercero, etc. Con armónicos de cierta intensidad seria fácil equivocarse al contar las pulsaciones, sobre todo si los golpes del sonido fundamental son muy lentos y separados por silencios de uno ó dos segundos; si en tales condiciones se quiere apreciar el tono de los sonidos que pulsan, es preciso recurrir á resonadores.»

El concurso de dos sonidos muy intensos, de distintos tonos, da asimismo lugar á un fenómeno particular que difiere á la vez de los sonidos primarios y de sus armónicos. Para valuar el tono de este sonido, llamado *resultante*, se restan los números de vibraciones de los sonidos componentes. Dos notas á la octava, cuyo intervalo expresa la relacion de los números 1 y 2, producen un sonido representado por 1, es decir, al unísono del más grave; dos notas á la quinta (relacion 2 á 3) dan el sonido resultante 1, octava grave del primer sonido; á la tercia mayor (relacion 4 á 5), producen el sonido 1, que está á la doble octava grave del primer sonido, y así sucesivamente. Como se ve, la ley es semejante á la que da el número

de pulsaciones, habiéndose deducido de ella que los sonidos resultantes no eran otra cosa sino el sonido engendrado por el concurso de pulsaciones bastante rápidas para producir en el oído la impresion de un sonido musical. Pero esta teoría no era exacta, segun lo ha demostrado Helmholtz práctica y analíticamente.

Y en efecto, este físico ha probado que, además de los sonidos resultantes diferenciales que acabamos de definir, hay sonidos resultantes cuyo tono se mide por la suma de los números de vibraciones de los componentes.

Un organista aleman, Sorge, fué el primero que observó los sonidos resultantes, pero el célebre músico italiano Tartini llamó ántes que nadie la atencion de los físicos hácia tan curioso fenómeno, en 1754.

CAPÍTULO IX

EL OIDO Y LA VOZ

I

EL ÓRGANO DEL OÍDO EN EL HOMBRE

Todos los fenómenos físicos se revelan al hombre por la impresion que producen en sus órganos. Ante todo son para él sensaciones simples ó compuestas, segun que tomen parte en su produccion uno ó varios sentidos: así por ejemplo, percibimos la luz por mediacion del órgano de la vista, del ojo; por el tacto tenemos la sensacion del calor; el esfuerzo que hacen nuestros músculos para levantar un cuerpo pesado, la vista de una piedra que cae, son para nosotros una demostracion de la gravedad, y por último, el oído nos da la sensacion del sonido.

Mas para estudiar los fenómenos en sí mismos, para hallar las condiciones y las leyes de su modo de producirse, interesa que discernamos, entre las sensaciones experimentadas, lo que corresponde á nuestros órganos de lo que les es extraño, exterior, única condicion mediante la cual es accesible á nuestra inteligencia la naturaleza peculiar de los fenómenos. A decir verdad, esta abstraccion nunca es completa, por cuanto no hay una observacion, una sola experiencia que no requiera la presencia del hombre y la intervencion de alguno de sus sentidos para comprobar los resultados. ¿Cómo pues lograremos abstraernos de nosotros mismos, por decirlo así, en el estudio de los fenómenos físicos? La verdad se abre paso poco á poco y los fenómenos se nos presentan en toda su independencia, variando de todas las maneras posibles sus modos de producirse así como los métodos de que nos valemos para observarlos, y comparando unas con otras las sensaciones que experimentemos.

Gracias al empleo de estos métodos, sabemos ahora lo que es el sonido; sabemos que consiste en un movimiento particular de las moléculas de los cuerpos elásticos, sólidos, líquidos y gaseosos. Hemos comprobado la existencia de las vibraciones y estudiado sus leyes. Réstanos ahora saber cómo se comunican estas vibraciones á nuestros órganos, hasta el momento en que formando parte integrante, por decirlo así, de nuestro sér, la conmocion que producen en nuestros nervios se trasforma en una sensacion particular, que es la del sonido. El oído es el aparato especial del hombre y de todos los animales encargado de recoger las vibraciones sonoras y de trasmitirlas al nervio auditivo. Procuremos hacer comprender, segun los anatómicos, la disposicion y funciones de las varias partes de este órgano.

Todos conocemos el oído externo ú oreja, situado á cada lado de la cabeza y compuesto de dos partes, el *pabellon* y el *conducto auditivo*. El pabellon A (fig. 339) consiste en una membrana cartilaginosa cuya forma varía segun los individuos, pero que por lo comun presenta el contorno de un óvalo irregular más estrecho en su parte inferior. En el centro, una especie de embudo redondeado, ancho de boca, la *cuenca*, forma la entrada del conducto auditivo B, especie de tubo sonoro que termina á cierta profundidad, en el mismo punto en que empieza el oído medio. Allí, separado del conducto auditivo por una membrana tenue y delicada C,

llamada tímpano, hay una especie de tambor D, conocido con el nombre de *caja del tímpano.* La membrana del tímpano está inclinada con bastante oblicuidad sobre el eje del conducto auditivo, de suerte que su superficie es notablemente mayor que la seccion recta del conducto en el punto de su insercion. La caja del tímpano tiene cuatro orificios, dos abiertos en la pared situada enfrente de la membrana, y como el uno es de forma circular y la del otro es elíptica, se los distingue con los nombres de *ventana redonda* y *ventana oval.*

En la parte inferior del tímpano desemboca por el tercer orificio un canal I, que pone en comunicacion al oído medio con el aire exterior por mediacion de las fosas nasales. Por último,

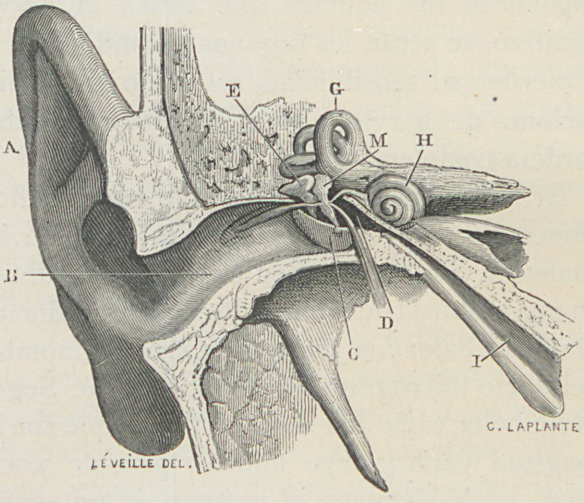


Fig. 339.—El oído humano
A, Pabellon de la oreja; B, conducto auditivo; C, membrana del tímpano; D, caja del tímpano; E, yunque; M, martillo; H, caracol; G, canales semicirculares; I, trompa de Eustaquio.

en la parte superior de la caja está la cuarta abertura.

En el interior del tímpano se ve una serie de huesos pequeños; es la *cadena de los huesecillos,* cuyas formas y posiciones relativas están representadas en la figura 340. Uno de ellos, el *martillo* M, se apoya por una parte en la membrana del tímpano y por otra en el *yunque* E. Los otros dos son el *hueso lenticular* L y el *estribo* K, uno y otro llamados así á causa de su forma. La base del estribo está unida con la membrana que sirve de tabique á la membrana oval. Dos pequeños músculos mueven el martillo y el estribo, apoyándolos con más ó ménos fuerza contra las membranas vecinas.

Detrás de la caja del tímpano está el *oído interno,* que parece la parte más esencial del órgano del oído, por lo cual está protegido por las partes más duras del hueso temporal, ó sea las que los anatómicos llaman el *peñasco.* Tres

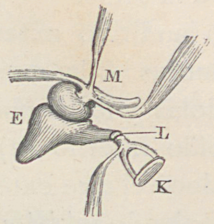


Fig. 340.—Detalles de la caja del tímpano. Cadena de los huesecillos

cavidades particulares componen el oído interno: el *vestíbulo,* en medio, los *canales semicirculares* G en la parte superior y el *caracol* H en la inferior. Su conjunto forma el *laberinto membranoso,* cuyo interior está tapizado en toda su extension por una membrana bañada de un líquido gelatinoso, en cuyo líquido se sumergen las ramificaciones del nervio auditivo, que penetra en el laberinto por un canal huesoso llamado *conducto auditivo interno.*

Tal es la descripcion de las principales partes que constituyen el órgano del oído en el hombre; en la serie animal descendente va desapareciendo por grados el oído externo y el medio; mas, á medida que el órgano se simplifica, se desarrollan más las partes restantes. Digamos ahora qué papel desempeña cada una de ellas.

Es indudable que el pabellon tiene por objeto reunir y reflejar las ondas sonoras en el interior del conducto auditivo externo, y así lo prueba el que los animales que pueden mover

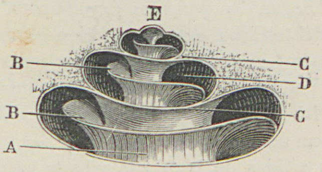


Fig. 341.—Corte del caracol

el pabellon lo vuelven hácia el lado de donde proceden los sonidos tan luégo como los perciben. El hombre no tiene esta facultad; para obtener el mismo resultado, ha de volver la cabeza poniendo el orificio del pabellon en la direccion de donde le parece que proceden los

sonidos (1); pero se ha observado que tienen el oído más sutil las personas cuya oreja está más separada del cráneo, y nadie ignora que para oir mejor basta agrandar artificialmente la superficie reflectora del oído externo ahuecando la mano junto á la oreja.

El conducto auditivo externo trasmite las vibraciones sonoras á la membrana del tímpano, reforzándolas, y luégo por la cadena de los huecesillos al oído interno (2). La trompa de Eustaquio conduce el aire exterior á la caja del tímpano, manteniendo así hácia el lado interior de la membrana la misma presion que en el exterior en la cara vuelta hácia el conducto auditivo externo. Por lo que toca á los huecesillos, además de su mision de trasmitir las vibraciones al oído interno más fácil y enérgicamente de lo que lo haria un cuerpo gaseoso, sirven tambien, segun Savart y Muller, para moderar el efecto de los sonidos demasiado estridentes; y sobre todo para estirar la membrana del tímpano y la de la ventana oval, haciéndolas así más sensibles al movimiento vibratorio, del mismo modo que, segun Muller, una varilla sólida puesta entre dos membranas aumenta la intensidad de la trasmision sonora. De aquí procede la diferencia que existe, desde el punto de vista de la sensacion, entre los modos de audicion que la lengua caracteriza con las palabras: *oir*, *escuchar*. La persona que oye solamente, experimenta una sensacion ménos fuerte, porque no hace intervenir la accion de su voluntad. En cambio, cuando se pone á escuchar, da instintivamente la órden de entrar en funciones á los músculos del martillo y del estribo; las membranas se distienden y el sonido parece más intenso y más distinto. Esta opinion, emitida por Bichat, ha sido adoptada por los fisiólogos y los físicos (3). Parece que el grado de tension de la membrana del tímpano varia tambien con el de agudeza ó gravedad de los sonidos que se han de percibir; para escuchar los agudos la membrana se estira mucho más que para los graves.

Hemos dicho ántes que el oído interno es la parte esencial del órgano del oído, y en efecto, la observacion ha demostrado que se puede perder la membrana del tímpano y los huesecillos sin que sobrevenga la sordera. Es sin embargo indispensable que no se desgarren las dos ventanas del tímpano, porque entónces, escapándose los líquidos que bañan el nervio auditivo, se secan los órganos del oído interno y pierden su sensibilidad, así como las ramificaciones del nervio mismo. En este caso habrá sordera completa.

El nervio auditivo distribuye sus ramificaciones en dos ramas principales, una de las cuales, la que penetra en el caracol, se divide en una multitud de ramúsculos de extraordinaria tenuidad llamados *fibras de Corti* del nombre del docto micrógrafo que los descubrió. Segun Helmholtz, cada una de estas fibras, que son de longitud varia y cuyo número pasa de 3,000, vibra probablemente al unísono de un sonido particular, de suerte que forman una serie regular análoga á la gama musical. Suponiendo que 200 de ellas correspondan á los sonidos situados fuera de los límites musicales, «quedan, dice,

(1) Nos cuesta mucho trabajo apreciar la direccion del sonido, ó mejor dicho, la del foco sonoro, cuando no vemos la posicion del cuerpo que lo contiene. Segun los recientes experimentos de M. Graham Bell, el inventor del teléfono, esta apreciacion es todavía más difícil si sólo escuchamos con un oído. En su concepto es necesaria la audicion *biauricular* para percibir la direccion de los sonidos, casi como es indispensable la vision biocular para tener la sensacion del relieve y apreciar la distancia de los objetos.

(2) Las partes sólidas de la cabeza, y hasta los dientes, trasmiten directamente al oído interno las vibraciones sonoras; así es que si se cuelga un timbre de un hilo sujeto con los dientes, y se tapan préviamente los oidos, se oye un sonido grave trasmitido por el hilo, los dientes y los huesos del peñasco hasta el oído interno. Los sordos, cuyo achaque reconoce por única causa alguna conformacion viciosa de los órganos exteriores, puede oír de este modo, y Broussais hace mencion de un español que oia los sonidos de una guitarra poniéndose entre los dientes el mango del instrumento. Recientemente se ha utilizado esta propiedad para construir aparatos para los sordos: más adelante describiremos estos aparatos, que llevan el nombre de *audífonos*.

(3) ¿Está á cubierto de toda objecion? ¿Se ha demostrado prácticamente que la distincion, bien establecida de hecho, entre los dos estados fisiológicos sucesivos por los cuales pasa una persona que, limitándose en un principio á oír, pasa en seguida á escuchar, tiene únicamente por causa el paso de una tension ménos fuerte de la membrana del tímpano á otra que lo es más? En todo caso, la intervencion de la voluntad puede obtener algo más que el simple tránsito del órgano del oído de un estado casi pasivo á una actividad más intensa; en ciertos casos puede elegir entre las sensaciones auditivas. Todo el mundo ha observado que en medio de un confuso murmullo de muchas conversaciones que á veces se oyen sin escuchar ninguna, el oído puede, prestando la debida atencion, atender una de las conversaciones parciales que entónces oye distintamente, al paso que continúa *oyendo*, pero no *escuchando* las demás voces que á pesar de ello no dejan de afectarle; para producir este resultado, la voluntad no ha podido actuar evidentemente sobre la membrana del tímpano, ó al ménos sobre ella sola, por cuanto entónces la membrana más distendida, más sensible, lo seria para una voz lo mismo que para las otras. ¿No serán las fibras de Corti, de que luégo hablaremos, las que efectúan semejante distincion? De todos modos, parécenos que hay motivo para indagar todavía la verdadera explicacion del fenómeno.

2,800 fibras para las siete octavas de los instrumentos de música, es decir, 400 para cada octava, 33 para cada semi-tono, y en todo caso las bastantes para explicar la distincion de las fracciones de semi-tono, en el límite posible.» Admitiendo esta mision de las fibras de Corti, compréndese cómo se trasmite el mecanismo de las vibraciones sonoras hasta el nacimiento de los nervios. Estas vibraciones, bien sean simples ó compuestas, llegan por el conducto auditivo hasta la membrana del tímpano, y en seguida se trasmiten por la caja del tímpano, la cadena de los huesecillos y las membranas de las dos ventanas, redonda y oval, hasta el oído interno. Al llegar á este punto, conviértense de vibraciones aéreas en vibraciones de cuerpos líquidos y sólidos, hasta las fibras de Corti. Finalmente, aquí se efectúa la distribucion, y cada vibracion simple de tono musical determinado encuentra una fibra que la reciba. Así se puede explicar tambien la descomposicion de un sonido compuesto y de sus armónicos, como la sensacion simultánea del sonido fundamental y del armónico predominante, es decir, del timbre.

Vése por los detalles precedentes que la teoría del oído presenta aún oscuridades; pero á los fisiólogos más bien que á los físicos incumbe disiparlas enteramente (1). Lo admirable en esta organizacion de uno de los sentidos más útiles para la conservacion del individuo y para sus relaciones con sus semejantes y con el mundo exterior, y que además es manantial de goces deliciosos y profundos, es su maravillosa facultad de percibir un número indefinido de sonidos.

Por lo demás, la coexistencia de las vibraciones en el aire y en los medios á propósito para propagar el sonido, explica esta propiedad del oído, el cual no hace más que trasmitir á los nervios y de estos al cerebro las mil modificaciones de los medios elásticos en los que estamos metidos.

(1) El órgano del oído está conformado casi del mismo modo en todos los mamíferos, sólo que ciertas partes están más desarrolladas unas veces, y otras ménos; las aves tienen el aparato de la audicion construido siempre sobre el mismo plano, si bien es muchísimo más sencillo que el nuestro. No se sabe que los insectos tengan órgano del oído, aunque la funcion existe, toda vez que estos animales producen sonidos con los que se llaman desde léjos. Por último, los moluscos, excepto los cefalópodos superiores, carecen de sentido auditivo.

II

LA VOZ HUMANA

Terminemos este estudio de los fenómenos del sonido con una sucinta descripcion del órgano de la voz en el hombre, de ese instrumento natural de música con cuyo auxilio comunicamos nuestras ideas, instrumento tan flexible y completo, que los artificiales más

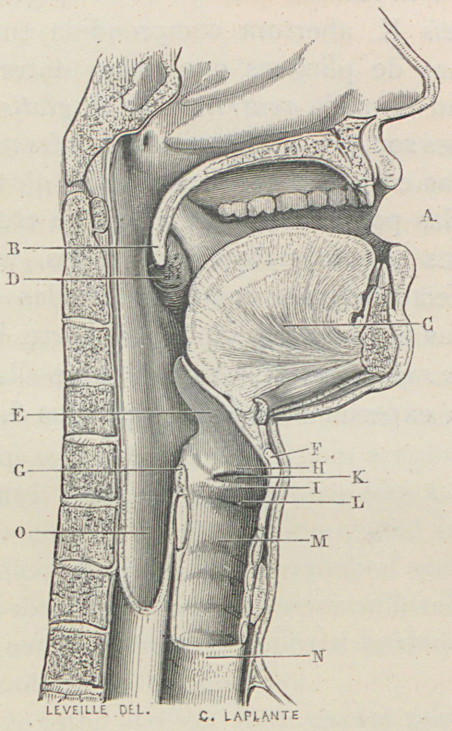


Fig. 342.—Organo de la voz humana, caja interior de la laringe: E, epiglotis; H, ligamentos superiores; I, cuerdas vocales; K, glotis; N, traquearteria

perfeccionados no llegan á tener esa diversidad de matices y de timbres que permite á la voz humana expresar los sentimientos y las pasiones más opuestas.

El órgano de la voz no es otra cosa sino un instrumento de viento, es decir, un aparato en que producen los sonidos las vibraciones más ó ménos rápidas del aire al pasar por una abertura de forma particular y variable dimension. El aire llega de los pulmones por un tubo ó canal anular N llamado *traquearteria;* de aquí penetra en la *laringe* M, en donde entra en vibracion y produce los sonidos de la voz, y luégo en la *faringe*, embudo situado en la parte posterior de la boca. El sonido llega entónces á las cavidades de las fosas nasales y de la boca, que desempeñan el papel de cajas de refuerzo y dan al sonido un timbre especial.

La figura 342 representa la conformacion interior de la laringe. Como se ve, es una especie de caja cartilaginosa terminada inferiormente por la traquearteria N, y en la parte superior por el *hueso hioides*, en forma de herradura. Una especie de válvula movible, la *epiglotis* E, se puede bajar tapando la parte superior de la laringe é impidiendo así que los alimentos penetren en ella, lo cual produciria la extincion de la voz ó la asfixia. Debajo de la epiglotis está la *glotis* K, abertura comprendida entre dos sistemas de pliegues que dejan entre sí una cavidad llamada *ventrículo de la glotis*. Estos pliegues son, por una parte, las *cuerdas vocales* I, situadas en la parte inferior de la glotis y así llamadas porque en un principio se creyó que eran las que formaban los sonidos, vibrando por efecto del aire, como las cuerdas sonoras frotadas por un arco; y por otra parte, los *ligamentos superiores* H, situados sobre ellas.

Los experimentos hechos por los fisiólogos han demostrado que las cuerdas vocales vibran como las lengüetas batientes de los tubos sonoros, y que los sonidos así producidos son más ó ménos agudos, segun que la tension mayor ó menor de las cuerdas vocales modifica la forma y las dimensiones de la abertura de la glotis. Cuando el sonido llega á la boca, está ya determinado su tono, no sufriendo otras modificaciones sino las que constituyen su timbre ó forman la voz articulada. Los movimientos de la faringe, de la lengua y de los labios sirven para producir estos varios cambios, de los cuales no debemos ocuparnos aquí.

Unicamente diremos que la voz del hombre difiere por su gravedad de las de la mujer y del niño, debiendo este carácter á las mayores dimensiones de la laringe y de la abertura de la glotis. El desarrollo rápido de este órgano en los jóvenes, al llegar á la edad de la pubertad, es la causa de la trasformacion que se nota entónces en su voz.

SEGUNDA PARTE

ACÚSTICA.—APLICACION DE LOS FENÓMENOS Y DE LAS LEYES DEL SONIDO

CAPÍTULO PRIMERO

LA TELEFONIA

I

LAS SEÑALES ACÚSTICAS EN LA NAVEGACION; BOYAS DE CAMPANA.—LOS TUBOS ACÚSTICOS.—LA MUJER INVISIBLE

La idea de emplear el sonido, la voz humana, las campanas ú otros instrumentos acústicos para dar avisos ó noticias á larga distancia, es muy antigua. El alcance del sonido es sin duda infinitamente menor que el de la luz, y por eso las señales luminosas han deparado un medio de telegrafía utilizado muchísimo tiempo ántes que la electricidad llevara, por decirlo así, á la perfeccion ese arte tan precioso, esa aplicacion tan útil.

Pero la luz no se ve ó se ve mal durante los tiempos ó dias brumosos, ó en medio de las tempestades, y el sonido es entónces un auxiliar útil que se emplea siempre en la marina, á la entrada de los puertos y en las inmediaciones de los escollos.

«En los tiempos brumosos, dice M. Renard, se indican á los navegantes las entradas de los puertos volteando campanas, con ciertos intervalos de silencio. Algunos faros poseen tambien estos aparatos. En los Estados Unidos, en donde las nieblas son tan frecuentes y tan espesas, no se ha retrocedido ante los gastos que exigia el dar mayor alcance á los sonidos, y se ha instalado en muchos puntos campanas que pesan hasta 500 kilógramos y más, y en otros, grandes silbatos que se hacen resonar con aire comprimido.» *(Los Faros.)*

En los pasos de los canales, cerca de los arrecifes ó de las rocas, se ven á menudo boyas provistas de campanas que advierten del peligro á los marinos.

Las campanas de las iglesias, en las ciudades y en los campos, son señales telefónicas que anuncian á lo léjos á los fieles las ceremonias del culto, y estos conocen por el modo de tocarlas, la clase de la ceremonia anunciada. En caso de incendio, el toque de alarma lanza á los aires sus sones siniestros y reclama el auxilio de las gentes. Pero en todos estos casos se emplea el sonido en pleno aire, sin ningun procedimiento especial para propagarlo á larga distancia conservándole su intensidad inicial. Los medios ideados para conducir el sonido á mayores distancias que su alcance ordinario son los que constituyen, propiamente hablando, lo que llamamos hoy *telefonía*.

Uno de estos medios, muy usados para distancias cortas, consiste en hacer de modo que el sonido se propague por tubos en que la masa limitada de aire que se agita en un extremo, trasmita, casi sin perder nada de él, toda la fuerza viva de la conmocion sonora. Los *tubos acústicos* ó *speaking tubes*, como dicen los ingleses, son hoy de muy frecuente uso en las casas particulares, en los talleres, fábricas y almacenes, en que los empleados necesitan hablar de un departamento á otro departamento lejano, ó de un piso á otro. Tambien se usan en los buques para trasmitir órdenes á los vigías de las gavias, y á los maquinistas y fogonistas. Por lo comun son tubos cilíndricos y flexibles de goma (fig. 343) que terminan en orificios de hueso, ó marfil, en forma de boquillas anchas, en las cuales va encajado un silbato. Se sopla primeramente en el tubo para que suene el silbato puesto en la otra extremidad y para que la persona, avisada por el silbido, aplique el oído al orificio del tubo. En seguida responde del mismo

modo para indicar que ha oido la señal, y se entabla la conversacion á media voz ó en voz baja cuidando de aplicar alternativamente la boca y el oído á la abertura de la boquilla.

Los jugadores de manos no han dejado de utilizar en las ferias y festejos populares la propiedad que tienen los tubos de trasmitir la palabra á larga distancia. M. Radau cita en su *Acústica* muchos ejemplos de estas aplicaciones entretenidas, y entre otros el siguiente:

«La *mujer invisible*, que causó á principios del siglo tan gran sensacion en las principales ciudades del continente, se explica de un modo sencillísimo. El órgano más aparente de esta máquina (fig. 344) era una esfera hueca, con cuatro apéndices en forma de trompeta y suspendida libremente de un aparato de alambre, ó del techo de una habitacion, por cuatro cintas de seda. Rodeaba á esta esfera un enrejado sostenido por cuatro postes, uno de los cuales era

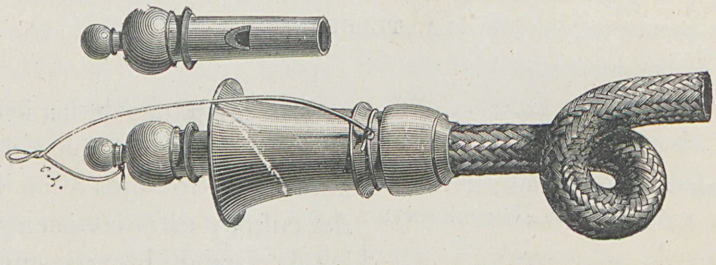


Fig. 343.—Tubo acústico ó *speaking tube.* Boquilla y silbato

hueco y comunicaba con el suelo. El tubo acústico que lo atravesaba terminaba en uno de los travesaños horizontales superiores, donde habia una hendidura muy pequeña, apénas perceptible á la vista, que hacia frente al orificio de una de las cuatro trompas. La voz parecia salir de la esfera. Es probable que la persona que estaba

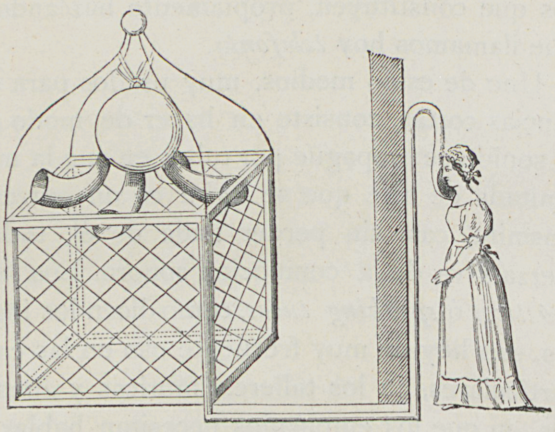


Fig. 344.—La mujer invisible

en la habitacion inmediata y daba las contestaciones, pudiera ver lo que pasaba en la sala por una abertura practicada en la pared. Hacíanse las preguntas por el orificio de una de las trompas.»

II

LA BOCINA Ó PORTA-VOZ

Tambien se trasmite la voz humana á larga distancia con un instrumento muy usado en la marina, llamado *porta-voz* (fig. 345). Es un tubo de forma cónica, el cual tiene en el extremo más delgado una ancha embocadura que se aplica á los labios sin estorbar su movimiento, y terminado en un pabellon cuya abertura se dirige hácia el punto á donde se quiere trasmitir el sonido.

Kircher hace mencion en su gran obra titulada *Ars magna lucis et umbræ* y en su *Phonurgia*, de una especie de gigantesco porta-voz, que describe con el nombre de *cuerno de Alejandro Magno* (fig. 346), y que se usaba en los ejércitos del conquistador para llamar á los soldados que estaban distantes hasta un centenar de estadios. Lo cierto es que el porta-voz reciente es de invencion moderna, la cual se debe segun parece á Samuel Moreland (1670): era una especie de trompeta de vidrio ó de cobre. Desde entónces se ha dado á estos instrumentos toda clase de formas, elípticas, hiperbólicas, y se ha procurado formular su teoría explicando el aumento del sonido por las reflexiones sucesivas de las ondas sonoras en las paredes interiores del tubo. Segun Lambert, la forma cónica ensanchada por la base hace que los rayos reflejados sean paralelos al salir del tubo, de suerte que todos se dirigen hácia el punto al que debe llegar el sonido. En este caso, las superficies que vuelven sus convexidades hácia el eje serán inútiles. Pero Hassenfratz ha visto por experiencia que de dos bocinas iguales, una provista de pabellon y otra sin él, la primera

permite oir el movimiento de un reloj colocado en su interior y á doble distancia que en la segunda. Así pues, la explicacion es inexacta ó por lo ménos incompleta.

Es probable que el refuerzo de los sonidos de las bocinas dependa sobre todo de la forma de la columna de aire agitada en su interior, y

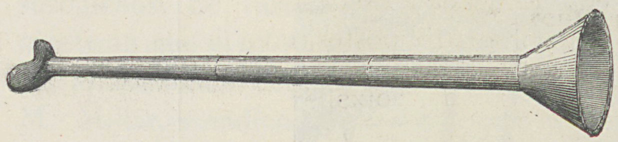


Fig. 345. — Bocina ó porta-voz

que las paredes mismas y la reflexion en su superficie influyan poco en aquel: y así lo confirma otro experimento de Hassenfratz, que cubrió dichas paredes con un paño sin que se debilitase el sonido ni el alcance de este. La influencia del pabellon no se ha explicado todavía.

Los porta-voces usados en la marina tienen hasta 2 metros de largo, con un pabellon cuyo diámetro llega á 30 centímetros. «En Inglaterra, dice M. Radau, se han hecho bocinas de más de 7 metros, con las cuales se pudo hacer llegar las palabras á unos 4 kilómetros de distancia: cuando se trata sólo de hacer oir un grito inarticulado, una buena bocina se oye á 5 ó 6 kilómetros.»

Los contramaestres de los buques de guerra usan silbatos para trasmitir las órdenes á los marineros. Más adelante nos ocuparemos de este pequeño instrumento de acústica de usos tan numerosos, y cuyos sonidos pueden ser de extraordinaria intensidad cuando se los produce con chorros de vapor, como en las locomotoras.

III

TRASMISION DEL SONIDO POR LOS SÓLIDOS.—TELÉFONO MUSICAL.—TELÉFONO DE CORDEL

R. Hooke, sabio físico contemporáneo de Newton, cuyo nombre hemos citado al hablar de la atraccion universal, concibió en 1667 la idea de trasmitir el sonido á lo léjos valiéndose para ello de la conductibilidad de los sólidos. Hé aquí un párrafo en el que se describe con toda claridad el experimento que á la sazon hizo, áun cuando no indica cómo preparaba su aparato: «Valiéndome de un hilo tirante, he podido trasmitir instantáneamente el sonido á gran distancia y con una velocidad, si no tan rápida como la de la luz, á lo ménos muchísimo mayor que la del sonido en el aire. Esta trasmision puede efectuarse no tan sólo con el hilo estirado en línea recta, sino tambien cuando forma muchos ángulos.» Tampoco dice Hooke si los sonidos que trasmitia así eran los de la voz articulada, ó simples sonidos musicales.

Antes de describir los teléfonos de cordel, cuya invencion parece reciente, y que parecen reproduccion del experimento de R. Hooke, debemos hacer mencion de la notable aplicacion que hizo Wheatstone de la conductibilidad de las varillas para el sonido. El experimento del sabio inglés data de 1819; vamos á describirlo tal como ha sido reproducido por Tyndall en una de sus interesantes conferencias dadas en la Sociedad real.

«En una sala situada en la planta baja, dice, y de la cual nos separan dos pisos, hay un piano. Al través de los dos techos pasa un tubo de hojalata de 6 á 7 centímetros de diámetro atravesado en la direccion de su eje por una larga varilla de abeto, uno de cuyos extremos sale del pavimento delante de esta mesa. La

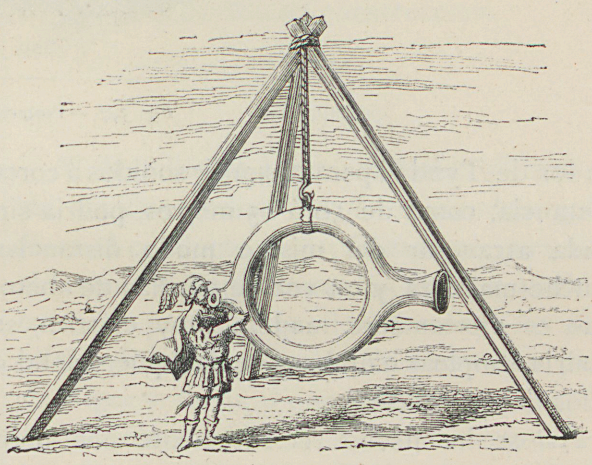


Fig. 346. — Cuerno de Alejandro Magno, segun el P. Kircher

varilla está forrada de cautchuc de modo que llena enteramente el tubo de hojalata, y su extremo inferior descansa sobre la mesa armónica del piano. En este momento un artista toca una pieza de música, pero no percibimos ningun sonido. Pongo este violin en el extremo de la varilla, y de pronto reproduce la pieza tocada por el músico, pero no con las vibraciones de sus cuerdas, sino con las del piano.

Quito el violin y cesa la música; pongo en su lugar una guitarra, y vuelve á empezar. Sustituyo el violin y la guitarra con una mesa de madera, y emite á su vez todos los sonidos del piano. Levanto la varilla lo suficiente para que no esté en comunicacion con el piano, y el sonido se extingue. Los sonidos del piano se parecen tanto á los del arpa, que difícilmente se puede creer que la música que se oye no es la de este último instrumento. Cualquier persona poco ilustrada se figuraría que tan maravillosa trasmision es obra de un hechicero.»

Este sistema de *telefonía musical*, del que se hizo uso en los experimentos de Wheatstone y



Fig. 347. — Porta-voz de la marina mercante

en los de Tyndall para trasmitir sonidos á corta distancia, como de 10 ó 15 metros, podria sin duda atravesar del mismo modo distancias mucho mayores, y en vez de varillas de abeto, que es ciertamente madera muy elástica, se podria emplear alambres de cualquier metal ó hilos de otra clase.

Así se ha hecho recientemente con unos aparatos muy sencillos, llamados *teléfonos de cordel*, que consisten en dos tubos cilíndricos, ó más bien, cilindro-cónicos de carton, madera ó bronce, uno de cuyos extremos termina en una membrana de papel recio ó de pergamino: cada membrana tiene un agujero por el cual pasa un cordel sujeto con un nudo. Si dos personas cogen respectivamente un tubo, y se separan hasta que el cordel esté bien tirante, podrán hablar en voz baja á regular distancia; la que habla cuidará de aplicar su boca al extremo ensanchado del tubo, y la que escucha de acercar del mismo modo el otro tubo al oído. Yo he hecho la prueba á unos sesenta metros de distancia con un sencillo bramante, y me ha salido muy bien. Parece, sin embargo, que los cordones de seda dan mejor resultado, y que con ellos se puede seguir una conversacion en voz baja á 150 metros de distancia.

Se han introducido varios perfeccionamientos en esta especie de juguetes científicos, que los hace muy útiles en muchas circunstancias. En el teléfono que acabamos de describir, el hilo debe estar tirante en línea recta entre los interlocutores, y esta necesidad limita naturalmente la distancia. A fin de obviar este inconveniente, M. A. Bréguet ha ideado un sistema de relevos con el cual se pueden hacer ángulos ó recodos, como R. Hooke lo indicó en un principio. M. Breguet emplea á este efecto, como soporte

del hilo en cada ángulo, y de cien en cien metros, pequeños cilindros cubiertos de una membrana, como las panderetas. Las vibraciones que parten de un extremo del sistema van trasmitiéndose así de membrana en membrana por intermedio del hilo.

M. du Moncel hace mencion en su obra *El Teléfono*, además de los perfeccionamientos susodichos, de varios experimentos que demuestran que el *teléfono de cordel* es susceptible de aplicaciones útiles. Por ejemplo, segun M. Millar, «tendiendo hilos á través de una casa y adaptándolos á boquillas y trompetillas auriculares colocadas en varias habitaciones, se

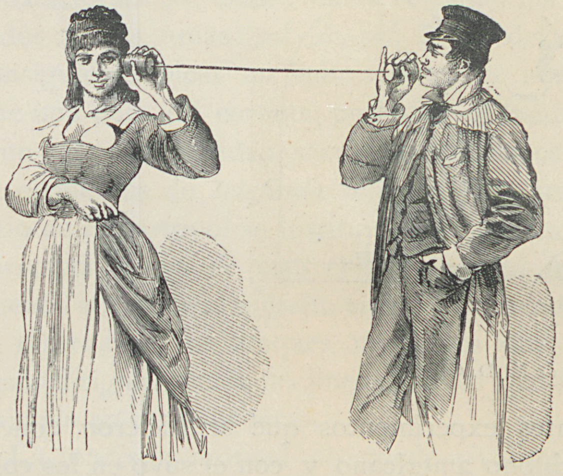


Fig. 348.—Teléfono de cordel

puede hablar fácilmente con las personas situadas en ellas.» M. Millar emplea para los discos vibrantes madera, ó metal ó guttapercha en forma de tambor; en el centro de estos discos están sujetos los hilos. Dicho físico ha reconocido que la intensidad de los sonidos aumenta con el diámetro de los hilos. Heaviside y Nixon han hecho experimentos con el teléfono de cordel, de los cuales ha resultado que con un hilo bien tirante se podia oir la palabra á 250 metros de distancia.

En los experimentos de telefonía musical ó parlante que acabamos de reseñar, trasmite directamente las vibraciones sonoras el aire ó columnas de aire encerradas en tubos, ó bien varillas ó hilos de materia sólida. En unos y otros casos, las trasformaciones del movimiento vibratorio en ondas aéreas ó recíprocamente, sólo han tenido por agentes las fuerzas moleculares de la elasticidad, tales cuales las hemos visto en todos los fenómenos sonoros estudiados hasta aquí.

Pero no sucede lo propio con los teléfonos há poco tiempo inventados, como los de Gray, Edison, Bell, etc., y con los numerosos aparatos, *micrófonos*, *fonógrafos*, etc., que han salido á luz de algunos años á esta parte, y cuyo modo de funcionar ha parecido maravilloso por varios conceptos. A decir verdad, no se trasmite con ellos el sonido á corta y áun á gran distancia; el agente de trasmision es la electricidad, la cual comunica al sonido la propiedad que posee de propagarse á distancias considerables, y por decirlo así, instantáneamente. En el momento en que escribimos estas líneas, ha tenido conocimiento el mundo científico de un nuevo invento más extraordinario todavía, del *fotófono*, debido al genio de Bell. En este aparato, la luz es el agente principal de la trasmision del sonido, pues la electricidad y luégo la elasticidad sólo desempeñan cierto papel en las estaciones extremas.

Como se comprenderá, hemos de aplazar para cuando tratemos de las Aplicaciones de la *Luz* y de la *Electridad* la descripcion completa y detallada de estos nuevos inventos, cuyo principio no se podria comprender perfectamente, si ántes no se hubiesen descrito y analizado con cuidado los fenómenos eléctricos y luminosos en que está basada su construccion.

IV

AUDÍFONO

Al describir el órgano del oído dijimos que los sonidos podian seguir un camino que no fuese el conducto auditivo externo para llegar al interno é impresionar los nervios auditivos, bastando para ello que los trasmitan las partes sólidas de la cabeza, como los dientes ó el peñasco. Síguese de aquí que los sordos, cuya enfermedad dimana de mala conformacion de los órganos exteriores, pueden oir los sonidos por intermedio de conductores sólidos. A nadie se le habia ocurrido aprovechar esta conocida propiedad, cuando en 1879 un americano, M. R. G. Rhodes, de Chicago, obtuvo privilegio de invencion por un aparato al que dió el nombre de *audífono*. Es una especie de pantalla de cautchuc endurecido, cuya forma está representada en la figura 350. La persona que se sirve de él lo sostiene por un mango y aplica contra los dientes de la mandíbula superior el extremo

de la lámina del audífono. Gracias á este artificio, muchos sordo-mudos han llegado á distinguir los sonidos musicales de algunos instrumentos, y hasta los de la voz articulada, y con mayor motivo han conseguido el mismo resultado favorable las personas afectadas de simple sordera.

Penetrado el ingeniero M. Colladon de las ventajas que tan sencillos aparatos podian tener para la educacion oral de los sordo-mudos, ha simplificado el audífono americano y héchole ménos costoso.

Hé aquí en qué términos da cuenta de sus experimentos: «He hecho muchas pruebas con láminas tenues de varias sustancias, como metales, maderas, etc., y por fin he descubierto una variedad de carton delgado y cilindrado que da los mismos resultados que el cautchuc endurecido, y que permitiria comprar por medio franco en lugar de cincuenta, aparatos del mismo poder acústico. Los cartones que me han dado este resultado son los que se conocen en el comercio con el nombre de *cartones de satinar*, muy compactos, homogéneos, elásticos y

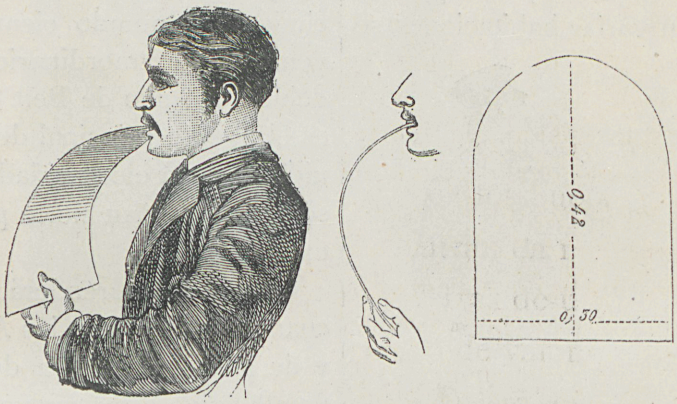


Fig. 349. — Audífono de carton de M. D. Colladon

tenaces; son tambien muy flexibles, y con tal que su grueso no exceda de un milímetro, basta una leve presion de la mano que sostiene un disco recortado en uno de esos cartones miéntras su extremidad convexa se apoya, doblándose, en los dientes de la mandíbula superior, para darle la curvatura conveniente, variable á beneplácito, y sin fatiga para la mano ó los dientes. Así pues, un sencillo disco de carton, sin mango, sin cordones ni fijador de tension, es un audífono tan poderoso como los aparatos de cautchuc del inventor americano. Se puede hacer impermeable el carton empapando la parte convexa, la que se apoya contra los dientes, en alguna sustancia hidrófuga que resista al vapor del aliento.

»Me he cerciorado de que se pueden trasmitir los sonidos á los dientes superiores con la misma claridad valiéndose de una tecla ó pinza de madera, del tamaño de una sordina de violin ó violoncelo, provista de una hendidura en la cual penetra á frotamiento duro el extremo superior del disco, y apoyando en dicha pinza los dientes superiores.»

M. Colladon cita á continuacion los interesantes experimentos que se hicieron con el audífono americano y con el suyo en los colegios de sordo-mudos del canton de Ginebra: salieron tan bien con el uno como con el otro aparato, y muchos sordo-mudos, que jamás habian oido los sonidos de un piano ni de ningun otro instrumento, experimentaron un verdadero placer al oir piezas de música, gracias á los audífonos puestos en sus manos. Se ha comprobado tambien que los sordo-mudos pueden oir y áun repetir palabras pronunciadas muy cerca del audífono, con tal que se les haya preparado de antemano convenientemente.

V

TELÉFONO MUSICAL PARA TRASMITIR ÓRDENES MILITARES EN EL EJÉRCITO Ó EN LA MARINA

La idea de valerse de los sonidos como medio de correspondencia militar es muy antigua. Sábese que los galos apostaban de trecho en trecho y al alcance de la voz vigías encargados de trasmitir órdenes ó de comunicar noticias militares; pero en esto no habia ningun sistema particular que asegurase el secreto de la cor-

respondencia, como en la *telefonía musical* de M. Sudre, de la que vamos á dar una idea.

Este sabio concibió en 1817 la idea de sustituir el lenguaje ordinario con señales musicales combinando de varios modos cierto número de notas de la escala, y diez años despues propuso la adopcion de su sistema para trasmitir órdenes en el ejército. En lugar de las siete notas de la escala, se limitó á las cinco *do sol do mi sol*, es decir, á los sonidos dados por la corneta de órdenes. En 1829 se hicieron algunas pruebas en el Campo de Marte, en 1841 en la escuadra del Mediterráneo, y en 1850 en el Campo de Marte en Rueil, y todas fueron muy satisfactorias. M. Sudre habia reducido los sonidos á tres notas: *sol*, *do*, *sol*. Más adelante consiguió emplear un solo sonido, de suerte que una nota de corneta, un golpe de tambor, ó un cañonazo pueden servir segun los casos de elementos de *telefonía militar*. Durante el sitio de Sebastopol se instituyó un sistema de correspondencia de esta clase, y prestó muy buenos servicios al ejército sitiador, avisando á la reserva de los ataques nocturnos que los rusos dirigian contra las líneas de los que trabajaban en las trincheras.

La telefonía musical no puede rivalizar ni con la eléctrica ni con las señales visuales; pero como hay casos en que no se podria hacer uso de ninguno de ambos sistemas, seria entónces conveniente adoptarla.

VI

TROMPETILLAS ACÚSTICAS. — EL ESTETOSCOPIO

La *trompetilla acústica* es un instrumento interesante por otro concepto, y apreciado en particular por las personas afectadas de sordera parcial. Refuerza los sonidos como la bocina, pero condensándolos á corta distancia y en el oído mismo del que escucha. Ya no es cuestion de *telefonía*, sino más bien de *microfonía*, asimilando el papel de estos útiles aparatos á los anteojos de que se sirven los míopes.

Las trompetillas acústicas son tubos cónicos, contorneados de varios modos (fig. 351), que la persona sorda tiene en la mano, introduciéndose en el oído el extremo más delgado, y volviendo el pabellon hácia la boca de su interlocutor. Se ha atribuido el efecto de refuerzo de estos aparatos á las reflexiones sucesivas de las ondas sonoras, que deben multiplicar su accion al llegar al tímpano. Pero, así como en el portavoz, se ha reconocido por experiencia que la influencia de las paredes, y por consiguiente de la reflexion en su superficie interior, era muy débil, cuando no nula. En realidad, el efecto producido se debe á la disminucion progresiva de las secciones aéreas que trasmiten el sonido, y que por lo tanto lo trasmiten con creciente energía hasta el órgano. Se puede comparar

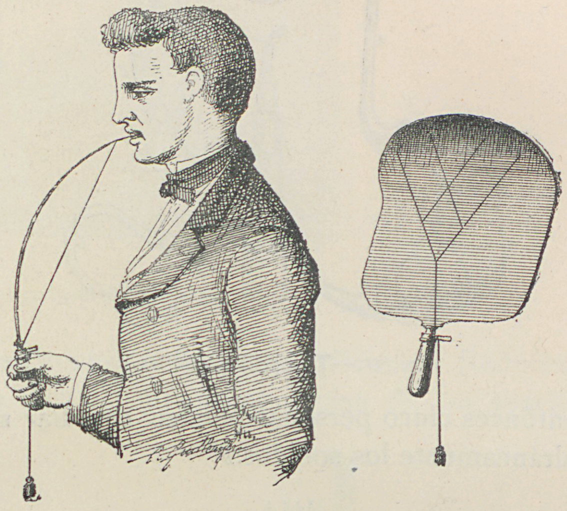


Fig. 350. — Audífono americano de M. Rhodes

este efecto con el de un chorro líquido que sale por el orificio de un tubo con una fuerza superior á la que animaria á un chorro semejante en el interior de un cuerpo de bomba.

El *estetoscopio* es una especie de trompetilla acústica inventada por Laennec, y del cual se sirven los médicos para escuchar los sonidos de los órganos interiores del cuerpo, del pecho, del corazon, etc. Es un cilindro de madera, ensanchado por la parte que se aplica al cuerpo, con un canal interior de algunos milímetros de diámetro, á cuyo extremo se acerca el oído. M. Kœnig ha ideado un nuevo estetoscopio fundado en la refraccion de la ondas sonoras. «Se compone de una pequeña cápsula hemisférica, en la cual penetra un anillo cubierto de dos membranas de cautchuc. Merced á una abertura que hay en el anillo se puede hinchar por insuflacion estas dos membranas, dándoles la forma de lenteja. La pequeña cápsula lleva en su parte superior un tubito en el que penetra otro de goma que debe poner la masa de aire interior en comunicacion directa con el oído. La membrana exterior, hinchada como hemos dicho, se aplica contra el cuerpo sonoro que se ha

de examinar; se modela sobre la forma de este cuerpo, recibe sus vibraciones y las comunica á la membrana opuesta por medio del aire contenido entre ellas; la segunda membrana las comunica en seguida al tímpano por la masa de aire comprendida en la cápsula y el tubo. Es posible adaptar cinco tubos á la cápsula sin perjudicar la claridad con que los sonidos llegan al oído,

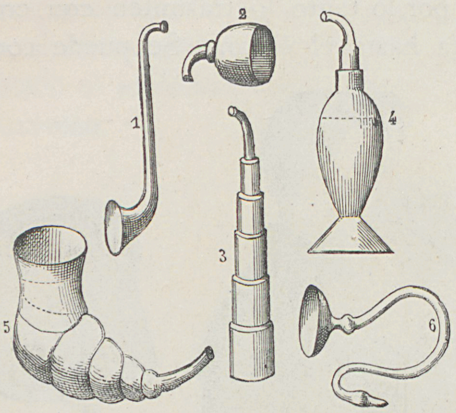


Fig. 351.—Trompetillas acústicas

y entónces cinco personas pueden estudiar simultáneamente los sonidos.»

VII

LA ACÚSTICA APLICADA Á LA ARQUITECTURA

Una de las aplicaciones más importantes que pudiera y debiera hacerse de las leyes de la acústica, es la que tuviera por objeto la construccion y acondicionamiento de las grandes salas de reuniones públicas. Se han hecho muchas tentativas por este concepto, pero han dado escaso resultado, consistiendo sin duda en que los arquitectos que las han efectuado tuvieron más en cuenta la cuestion artística que la científica; quizás tambien la carencia de conocimientos especiales ha entrado por mucho en este mal éxito casi general.

Las salas de reuniones públicas se pueden dividir en tres categorías, que no tienen absolutamente las mismas exigencias bajo el punto de vista acústico. Tenemos en primer lugar los salones para conciertos, en los cuales la audicion clara, distinta, no confusa, ha de ser el objeto principal: la orquesta y los puntos en que se sitúan los cantores forman el foco sonoro del cual divergen todas las ondas que deben ir á parar al oído del espectador, donde quiera que esté colocado, en las mejores condiciones para que le sean perceptibles hasta los más delicados matices de la melodía sin que deje de apreciar la armonía del conjunto. En ellos, se puede sacrificar la vista al oído, puesto que no hay espectáculo, hablando con propiedad, y todo se reduce á la audicion de un trozo musical. A veces se han reunido dichas condiciones por casualidad, y el salon de conciertos del Conservatorio de Paris es una prueba de ello, á juzgar por el testimonio unánime de artistas y aficionados.

Las salas de los teatros líricos forman una categoría intermedia entre las de concierto y aquellas en que sólo se ha de escuchar á un orador ó á actores. La música es tambien su principal objeto, pero el problema se complica con la necesidad de que todos los espectadores vean bien la escena. Además, el foco sonoro es allí doble, pues consiste, por una parte en la orquesta, y por otra en el escenario en que se sitúan los actores. En el mismo caso, poco más ó ménos, están las salas de los teatros. Los salones de las cátedras y de las asambleas deliberantes forman la tercer clase de los sitios de reunion. En ellas, la claridad de la audicion es la primera y casi la única dificultad que se ha de resolver, tan luégo como el local no es bastante espacioso para que las ondas sonoras pierdan su intensidad al llegar al oyente más apartado de la tribuna.

Analizando con cuidado todas las causas de los defectos que tienen las salas actuales, y teniendo en cuenta las leyes de la propagacion y reflexion de las ondas sonoras, se llegaria sin duda á resolver las dificultades del problema. La mayor parte de dichas salas pecan por defecto ó por exceso de sonoridad. En primer lugar, la forma de las paredes de la sala tiene una influencia predominante: la voz y los sonidos resultan absorbidos con frecuencia por masas de aire demasiado considerables en las que se pierde la fuerza viva de las ondas sonoras ántes que puedan llegar al oído del espectador. La altura excesiva del techo, la extension exagerada del escenario, lo anchuroso y profundo de los palcos, á menudo forrados de telas ó tapices que apagan el sonido, hacen que la sala sea sorda y poco favorable á la emision á la vez que á la audicion de la voz de los actores ú oradores, lo propio que á la de los sonidos instrumentales.

Las salas cuya forma es tal, que de ella resultan varios centros de divergencia de las ondas reflejadas, ó cuyas paredes están compuestas de sustancias que reparten el sonido con sobrada fuerza, adolecen del defecto contrario. Tienen una sonoridad exagerada, intempestiva y muy desigual, resuenan, y el espectador oye á la vez los sonidos directos y los reflejados, resultando de aquí confusion si se trata de un simple discurso, y la discordancia más desagradable, si de sonidos musicales.

Las reglas que deben seguirse para obviar tan graves inconvenientes no pueden ser generales, dado que habria que modificarlas segun las circunstancias de su aplicacion. Redúcense en suma á una combinacion de las sencillas leyes de la acústica con las de la construccion arquitectónica. Hé aquí lo que dice á este respecto M. T. Lachéz, arquitecto y autor de un opúsculo sobre la *Acústica y la Optica de las reuniones públicas*, del cual sólo mencionaremos lo que se refiere á las tres clases de salones que acabamos de enumerar:

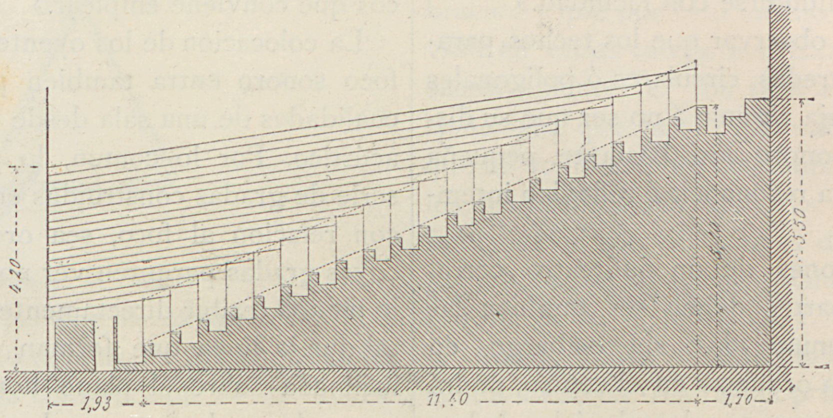


Fig. 352.—Seccion de anfiteatro: gradería en línea recta

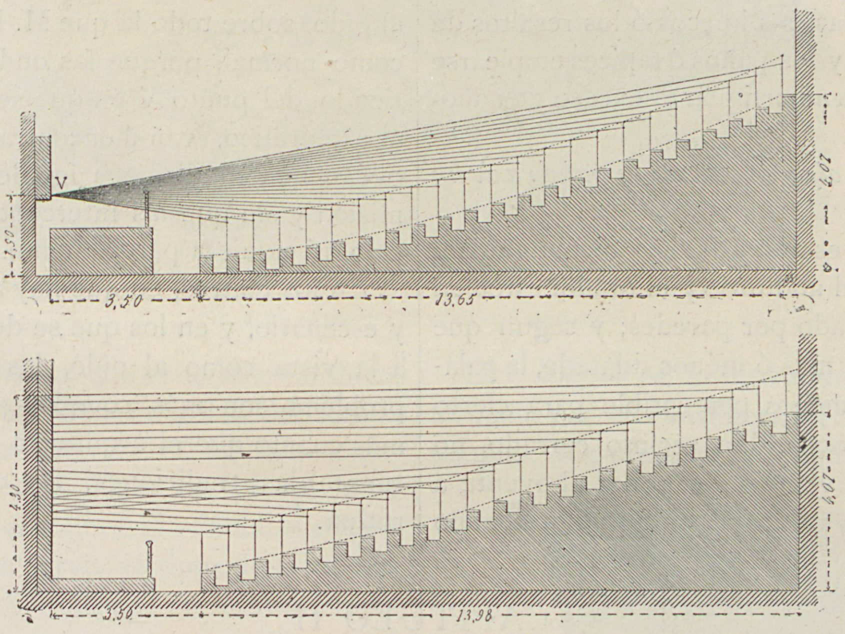


Fig. 353.—Anfiteatro del Observatorio y anfiteatro de disposicion normal, segun M. Lachéz. Graderías en línea mixta ó curva

«*Para hacer oir cantos ó sonidos musicales.*

»Ya se ejecute la música en un espacio ilimitado ó en un recinto cerrado por todas partes, los espectadores pueden muy bien no ver nada en uno ni en otro caso y percibir todos los sonidos sin divisar los instrumentos que los producen. Así pues el objeto principal y por decirlo así, el único que debe proponerse el arquitecto es situar el punto en que se producen los sonidos en el lugar más conveniente y en las circunstancias más favorables para que sean más perceptibles, más ricos y más armoniosos.

»Si la orquesta está al aire libre, el auditorio

debe agruparse alrededor de ella, para encontrarse dentro de la extension simple y natural de las ondas sonoras, y aquélla más elevada que los espectadores para que el punto de conmocion de las ondas se halle fuera de la masa de aire ocupada por estos, y á fin de que los sonidos puedan salir y difundirse con facilidad.»

El autor hace observar que los techos parabólicos y las paredes circulares ó poligonales no ofrecen ventaja alguna, á no ser que su distancia al foco sonoro sea bastante pequeña para que no haya resonancia ó reflexion intempestiva.

Las disposiciones de un anfiteatro cerrado por todas partes deben ser tambien las anteriormente enunciadas; sin embargo, en lugar de situar la orquesta en el centro, podrá suceder que haya que colocarla á los lados, porque los cantantes deben estar de frente á todos los espectadores. Las paredes que limitan el recinto han de presentar planos rectos, resistentes y lisos; es preciso evitar las salientes muy marcadas, los huecos ó los resaltos de ornamentacion, y los paños ó tapices emplearse únicamente para amortiguar el exceso de sonoridad de la sala.

«*Para que se oiga solamente la palabra de un orador.*

»En este caso es muy útil, si no absolutamente necesario, que el auditorio y el orador estén en un espacio limitado por paredes; y segun que este espacio sea más ó ménos dilatado, la palabra será más ó ménos perceptible para cierto número de personas. Un recinto cerrado, no tan sólo tiene la ventaja de poner al oyente á cubierto de todo ruido, de todo sonido extraño y de la intemperie, sino que tambien debe proporcionar recursos, ora para aumentar la intensidad sonora de la voz, ó bien para destruir enteramente las resonancias que la repercusion de las ondas produce; las dimensiones del recinto y su volúmen indican los medios acústicos que conviene emplear.»

La colocacion de los oyentes con relacion al foco sonoro entra tambien por mucho en las cualidades de una sala desde el punto de vista acústico. Por lo comun, lo preferible es una serie de gradas construidas en arco de círculo con relacion al foco, sea orquesta ó tribuna, cuyas gradas permiten ver normalmente ó por lo ménos recibir directamente los sonidos, con tal que la línea que forman esté suavemente inclinada sobre el plano horizontal del que parten las ondas sonoras. Las figuras 352 y 353 representan secciones de anfiteatros; en la primera, el perfil de las gradas se eleva en línea recta y sobrado bruscamente. La disposicion de las otras dos es más favorable á la vista ó al oído, sobre todo la que M. Lachéz considera como normal, porque las ondas sonoras, partiendo del punto V en que se supone situado al catedrático, van á encontrar á cada fila de oyentes en condiciones iguales de buena trasmision y sin que las intercepte ningun obstáculo, ni siquiera parcialmente.

En los teatros, en que hay á la vez orquesta y escenario, y en los que se debe atender tanto á la vista como al oído, las condiciones del problema son más complejas, y lo son tanto más cuanto que el arquitecto ha de tener en cuenta las tradiciones, las costumbres y la rutina.

CAPÍTULO II

LOS INSTRUMENTOS DE MUSICA.—INSTRUMENTOS SIMPLES

Seria un estudio sumamente curioso, pero delicado y difícil, el de los variadísimos instrumentos con los cuales ejecutan los músicos las piezas de su arte, considerando cada uno de dichos instrumentos desde el punto de vista de las leyes de la acústica musical. En todas las épocas de la historia han tenido todos los pueblos, hasta las tribus salvajes más atrasadas, instrumentos de esta clase, desde los más toscos y rudimentarios hasta los de forma más estudiada é inteligente como los violines modernos, imitados de los fabricados por los Stradivarius, Guarnerius ó Amati, y hasta las combinaciones complicadas de los grandes órganos de las ca-

tedrales. La teoría de los instrumentos de música es aún muy oscura en ciertos puntos, y tanto los prácticos más hábiles como los físicos más sabios, con dificultad se dan cuenta de las

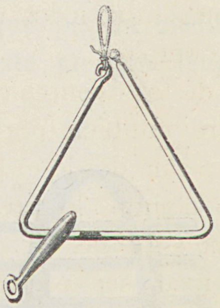


Fig. 354.—El triángulo

formas consagradas por la experiencia. Hay sin embargo cierto número de principios en los que está basada la construccion de los instrumentos, no careciendo de interés el conocer en qué se relacionan estos principios con las leyes de las vibraciones sonoras en las campanas, cuerdas, tubos y membranas.

Así procuraremos demostrarlo pasando revista á los tipos de instrumentos cuyos sonidos son producto de los diferentes modos de vibracion y que por esto mismo se los puede dividir en varias categorías. Examinaremos pues sucesivamente: 1.° los *instrumentos sencillos, monótonos*, que por lo general no emiten más que un sonido, como las campanas, los triángulos, los timbres, los tambores, etc., y que están fundados en las vibraciones de los sólidos de revolucion, de las placas ó láminas metálicas, y por fin, de las membranas; 2.° los *instrumentos de cuerda*, cuya innumerable familia puede subdividirse en tres ramas principales que tienen por tipos el violin, el arpa y el piano; 3.° los

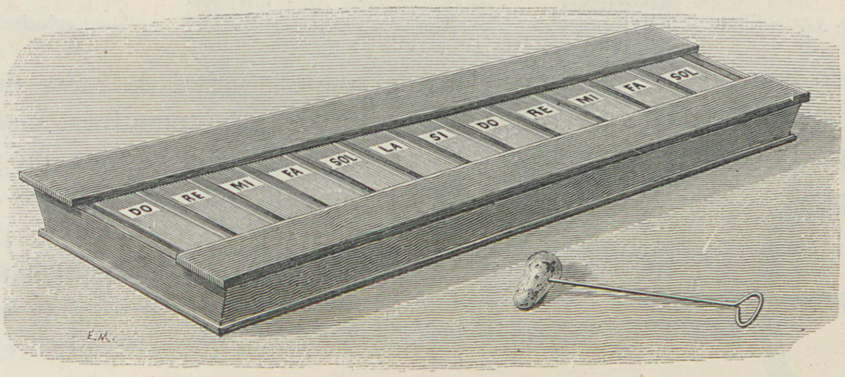


Fig. 355.—Armónica de cristales ó glass-cordes

instrumentos de viento, que se dividen tambien, con arreglo al modo de produccion del sonido dependiente de la embocadura, en instrumentos de embocadura de flauta, de trompa, y de lengüetas batientes ó libres: la flauta, el oboe y la trompa, pueden servir de tipos de estos tres géneros, todos los cuales se encuentran resumidos en el órgano, conjunto magnífico en el que todas las voces instrumentales tienen su expresion y que constituye por sí solo toda una orquesta.

I

INSTRUMENTOS SIMPLES FUNDADOS EN LAS VIBRACIONES DE LÁMINAS Ó PLACAS

Las placas y las varillas metálicas de varias formas vibran cuando se las frota longitudinal ó trasversalmente ó se las golpea en alguno de sus puntos, resultando de aquí sonidos que á veces se utilizan en las orquestas.

El *triángulo* es un instrumento de esta clase formado por una varilla cilíndrica de acero sin templar, que presenta la figura de un triángulo

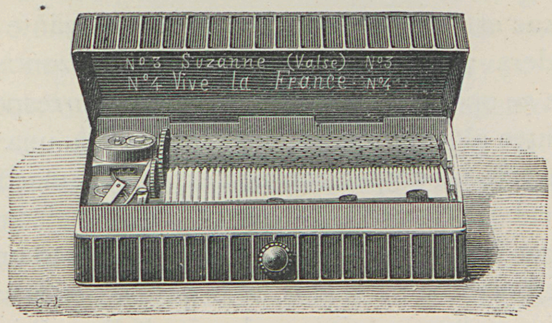


Fig. 356.—Caja de música

equilátero abierto por uno de sus vértices; á veces se le añaden anillas metálicas enfiladas en la base. El ejecutante golpea uno de los lados del triángulo con una varilla de acero, resultando de esta percusion una serie de soni-

dos armónicos cuya coexistencia da al instrumento su sonoridad, pero que no desempeñan en las piezas de música ningun papel, armónica ó melódicamente considerados. Es sólo un efecto singular, que no ofrece carácter alguno sino en el conjunto del trozo musical, cuyo ritmo acentúan los sonidos del triángulo.

El *glass-corde* ó *armónica de placas de vidrio* es otro instrumento compuesto de una serie de láminas de cristal, cuyas dimensiones están

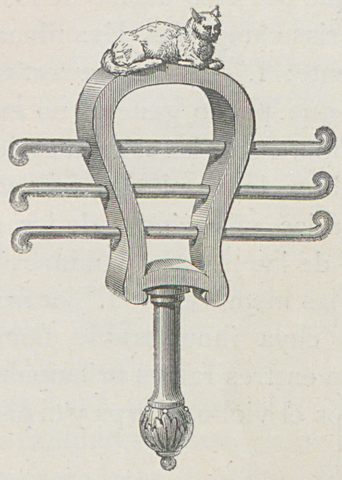
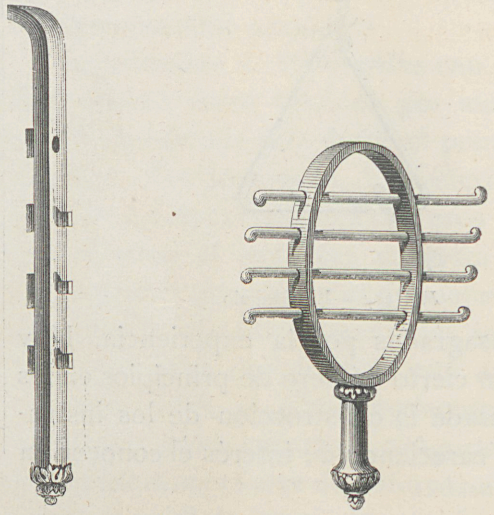


Fig. 357.—Sistro de Isis



Figs. 358 y 359.—Sistros de los antiguos egipcios

calculadas de modo que por la percusion producen las notas sucesivas de la escala con sus modulaciones (fig. 355): como las placas son

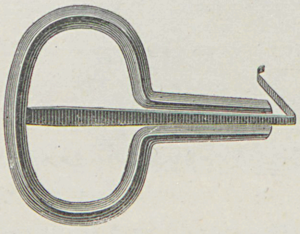


Fig. 360.—La trompa

de igual espesor, los cuadrados de sus longitudes están en razon inversa de los números de vibraciones de las notas de la escala. Estas placas están sujetas en una caja reforzante de madera por medio de cordones horizontales que se apoyan en las líneas nodales correspondientes al sonido fundamental de cada una de ellas. Se las golpea con una especie de martillo de cabeza de corcho, y así se pueden ejecutar piezas bastante variadas. Los negros usan unos instrumentos parecidos, sólo que no tienen caja y la madera sustituye al cristal. Por último, ciertas láminas metálicas dispuestas del mismo modo que en la armónica y que se golpean alternativa ó simultáneamente con martillos puestos en movimiento por un teclado, constituyen un instrumento que puede ejecutar trozos de música bastante complicados.

Dase el nombre de *cajas de música* á unos instrumentos automáticos, cuyos sonidos los producen las vibraciones de unas pequeñas lengüetas de acero ó de cobre colocadas como los dientes de un peine (fig. 356); las dimensiones de estas lengüetas están calculadas de modo que dan los sonidos de la escala con sus modulaciones. Estos dientes resuenan al rozar con ellos unas puntas de metal encajadas en el contorno de un cilindro, al que un mecanismo de relojería hace dar vueltas uniformes. La caja que contiene este mecanismo da á las notas emitidas por las lengüetas más fuerza y sonoridad, la cual aumenta si se pone el instrumento sobre una mesa. Se da cuerda al mecanismo con una llave como si fuese un reloj de bolsillo. Las puntas de metal de los cilindros están colocadas de modo que puedan ejecutar varias tocatas.

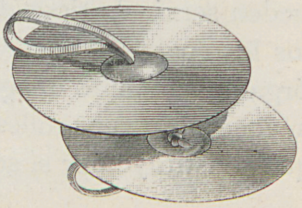


Fig. 361.—Platillos

Las figuras 357, 358 y 359 representan instrumentos antiguos conocidos con el nombre de *sistros* y usados en el antiguo Egipto: esta-

ban fundados sin duda en las vibraciones de las placas y varillas metálicas. La *trompa* (figura 360), que sirve de entretenimiento á los muchachos de las aldeas, y que probablemente se remonta á una apartada antigüedad, es un instrumento que podria clasificarse entre los sistros. Consiste en una lengüeta de acero, libre por un extremo y soldada por otro á un arco de doble curvatura que se pone entre los dientes. Haciendo vibrar entónces la lengüeta con la mano, se abre ó se cierra la boca para modificar ó reforzar los sonidos que despide el pequeño instrumento.

Los *platillos* (fig. 361) se usan en las orquestas como el triángulo. Son dos placas circulares de bronce que el músico sujeta en cada mano con cordones ó correas, y que golpea una con otra imprimiéndolas un movimiento de desliz.



Fig. 362.—Bonzos japoneses tocando el gong y los platillos

En el centro de cada platillo hay una cavidad de forma hemisférica que tiene su influencia en la produccion del sonido, pues de ella resulta un sonido más agudo que los producidos por las placas metálicas, de lo cual es fácil cerciorarse tapando con papeles las dos cavidades: pues entónces ya no se oye el sonido agudo.

Los sonidos de los platillos tienen cierta analogía con los de un instrumento chino llamado *gong*, *gonggong* ó *tamtam* (fig. 362), el cual no es otra cosa sino un disco de bronce de bastante diámetro (de 50 centímetros á 1 metro) y con un reborde circular. Se le golpea en los puntos inmediatos á la circunferencia con una varilla cuyo extremo es una almohadilla cubierta de piel. Los golpes repetidos del martillo producen un són sumamente complejo, de singular sonoridad, y que emite de vez en cuando, como por explosion, sonidos agudos ó graves. La impresion que causa tan raro instrumento es por demás extraña. Los chinos lo usan en las bodas, entierros, fiestas públicas ó religiosas y visitas á los mandarines de alto grado.

Los chinos distinguen los *gongs*, con arreglo á la intensidad de sus sonidos, que depende sobre todo de su modo de martillarlos, en gongs machos y gongs hembras. Los bonzos japoneses se sirven del gong y de los platillos en sus ceremonias. Chladni refiere que «este instrumento se usó en Copenhague con éxito en un *Oratorio* para representar el temblor de tierra ocurrido cuando la muerte de Jesucristo.»

II

CAMPANAS Y JUEGOS DE CAMPANAS

En lugar de dar una forma plana, rectangular ó discoidal á las placas vibrantes, se las puede construir tambien con la de sólidos de revolucion, hemisférica, elipsoidal, como de campanas y vasijas. Así resultan los timbres y las campanas que se destinan á variadísimos usos.

Por lo general se los emplea para servir de señales, ya en la vida doméstica, ó bien en la industria, en las fábricas, en las vías férreas, en los barcos, etc. Se hacen de todas clases y dimensiones, y los sonidos que emiten son por lo general un compuesto de los sonidos armónicos que producen las partes del cuerpo sonoro divididas por las líneas nodales. El sonido más grave ó fundamental es el que más hiere el oído, y la mezcla de los sonidos más agudos

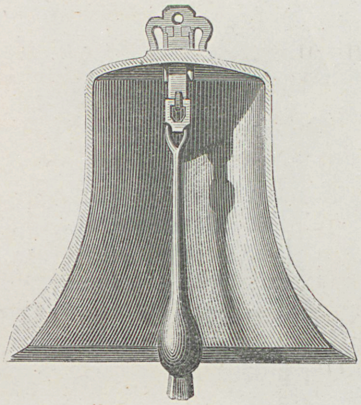


Fig. 363.—Seccion de una campana de iglesia



Fig. 364.—Vista exterior

da á la campana su timbre peculiar y del cual conserva fácil memoria el oído, áun cuando no lo pueda definir.

Las campanas de iglesia tienen, desde tiempo inmemorial, una forma tradicional, por decirlo así, cuyo corte y conjunto se representan en las figs. 363 y 364. La campana japonesa, reproducida en la fig. 365, es, como se puede ver, de forma muy distinta de la que tienen las campanas de las iglesias europeas. En estas, el perfil y los espesores del metal en las varias alturas del instrumento están calculados de modo que el sonido más grave producido por la vibracion del borde ó de la *panza* sea la octava grave del sonido del *cerebro*. Véase lo que dice Diderot en la *Enciclopedia* acerca de este asunto: «No siendo el diámetro del cerebro más que la mitad del de la campana, dará la octava superior á la de los bordes. El sonido de una campana no es un sonido simple; sino un compuesto de varios sonidos emitidos por las diferentes partes de aquella, entre los cuales los fundamentales deben absorber á los armónicos, como sucede en el órgano; cuando se toca á la vez el acorde perfecto *do mi sol*, se hace resonar *do mi sol ♯ si sol si re*, y sin embargo sólo se oye *do mi sol*. La relacion de la altura de la campana es como 12 : 15, ó la de un sonido fundamental á la tercia mayor; de donde se deduce que el sonido de la campana se compone principalmente del sonido de sus bordes, como fundamental, del del cerebro que está á su octava, y del de la altura que está á la tercia del fundamental. Pero es evidente que estas dimensiones no son las únicas que dan tonos más ó ménos graves; en toda la campana no hay una sola circunferencia que no produzca un sonido relativo á su diámetro y á su distancia del resto de aquella.»

Por lo demás, el ilustre enciclopedista hace ciertas reservas acerca de las reglas mediante las cuales se pretende determinar el sonido de una campana por su forma y por su peso. «Para ello, dice, seria preciso calcular tambien la elasticidad y la cohesion de las partes del metal de que están fundidas, dos elementos sobre los cuales no puede ménos de formarse vagas conjeturas.» En resúmen, la experiencia ó el oído son los que deciden con más certidumbre.

Los físicos modernos admiten que, en igualdad de circunstancias, las vibraciones de masas de formas semejantes y de la misma materia

están en razon inversa de las dimensiones homólogas, y se han basado en esta ley para formar, mediante un conjunto de timbres ó campanas de varios tamaños, series que emiten las notas sucesivas de las escalas y de sus modu-



Fig. 365. — Campana japonesa de Kioto

laciones. La figura 366 representa un antiguo instrumento de esta clase al cual se daba el nombre de *sonante*, y cuyos timbres, fijos en una caja que reforzaba sus sonidos, se golpeaban con dos varillas. Es una especie de armónica de campanas de metal. La armónica de Franklin se compone de una serie de campanas de cristal, ó simplemente de copas, que se hacen vibrar por frotamiento pasando los dedos mojados por sus bordes. Echando mayor ó menor cantidad de agua en cada copa, se obtiene el acorde con la exactitud que se desee.

No hay para qué decir que la mayor parte de estos instrumentos se usan muy poco; á la verdad, son objetos de curiosidad, interesantes sólo como aplicaciones de la acústica musical.

Los *juegos ó sistemas de campanas* de las iglesias ó de las torres de edificios públicos, son instrumentos de la misma clase de los que acabamos de describir; se componen de timbres ó campanas golpeadas con martillos blandos, ya automáticamente mediante los dientes de un cilindro, ó ya directamente por medio de teclas que se hacen funcionar con los dedos como las de un órgano ó un piano, ó ya en fin, como en los juegos de campanas primitivos, con un sistema de pedales que el ejecutante ponia en movimiento con el puño y con el pié. Los juegos de campanas de teclado constituyen un perfeccionamiento importante sobre los otros dos sistemas: tal es el instalado recientemente en la torre de San German l'Auxerrois y que consta de cuarenta y dos campanas de varios tamaños (fig. 368).

En las ciudades del Norte de Francia así como en otros países hay relojes públicos en que las campanadas de las horas y de las medias horas van precedidas de un aviso musical, de una pieza de ópera ejecutada por un juego de campanas de mecanismo automático. Los famosos juegos de campanas de Brujas, de Dunkerque y de otras poblaciones tienen un mecanismo análogo al de las cajas de música, sólo que sus cilindros son enormes y los dientes encajados en sus superficies levantan pesados martillos que caen sobre una serie de campanas acordadas con arreglo á las notas de la escala. El movimiento se comunica á los cilindros por medio de ruedas como las de los relojes; para

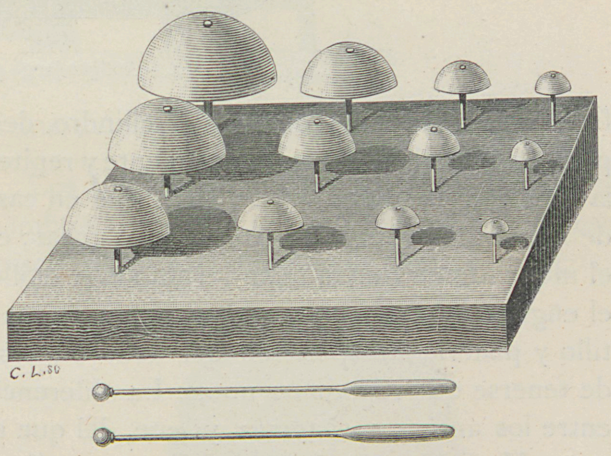


Fig. 366. — Timbres

que funcionen tan enormes máquinas se necesitan pesas motoras de muchos centenares y hasta millares de kilógramos, suspendidas de cadenas que se enrollan en tambores por medio de cábrias. Para subirlas de nuevo, son necesarios dos ó tres hombres que trabajan de media á tres horas.

Pero este antiguo sistema de juegos de campanas, que era á su vez un perfeccionamiento del sistema primitivo representado en la figura 367, se ha simplificado mucho en el de San German l'Auxerrois que acabamos de mencionar y que reproducimos en la fig. 368. Hé aquí su descripcion, segun M. Sire, director de la Escuela de relojería de Besançon:

«Los puntos principales de este nuevo sistema consisten: 1.° en el empleo de un engranaje especial para cada campana, proporcionado á su peso; 2.° en la separacion de estos engranajes, cuya mision consiste en levantar los cuatro martillos de cada campana que se detienen uno tras otro en un escape del que quedan suspendidos, y del cual parten mediante un leve esfuerzo del dedo ó del diente del cilindro, despues de lo cual caen instantáneamente y repiten la nota con bastante viveza para que en caso de necesidad toquen semicorcheas ó fusas; en el momento en que el dedo levanta el martillo, el engranaje gira para preparar un nuevo martillo y ponerle á disposicion del dedo en caso de tenerse que repetir las notas. La diferencia entre los antiguos sistemas y este, del que es autor M. Collin, consiste en no levantar directamente el martillo, sino en servirse de un engranaje intermedio entre la palanca y la tecla, lo cual anula casi el esfuerzo.»

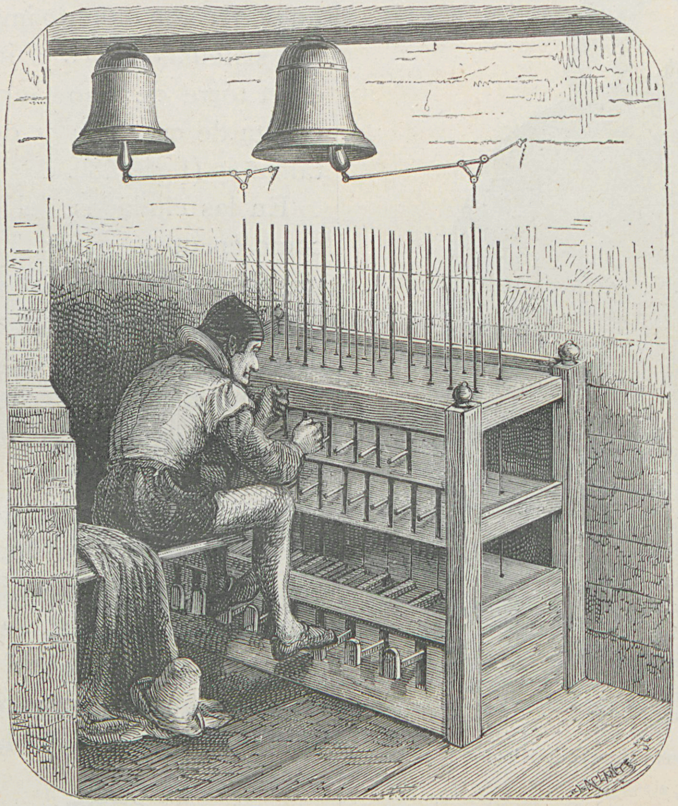


Fig. 367.—Antiguo juego de campanas: mecanismo primitivo

De aquí resulta que se puede emplear la electricidad como motor; y en efecto, el juego de campanas de San German l'Auxerrois tiene, además del teclado ordinario, otro eléctrico. «De este modo se podria, dice M. Sire, convertir el órgano de las iglesias en un sistema de repeticiones de campanas, lo cual seria de un efecto muy nuevo y original.»

III

LOS TAMBORES

Lleguemos ahora á la descripcion de instrumentos simples cuyos sonidos resultan de las vibraciones de pieles ó membranas tirantes, y que por lo comun están reforzados por una caja. Conóceseles generalmente con el nombre de *tambores* y de *timbales*.

El más sencillo de estos instrumentos es el llamado *pandero* ó *pandereta*, consistente en una membrana muy estirada sobre una caja cilíndrica adornada en torno de cascabeles ó de plaquitas de metal (fig. 369). Se sostiene

este instrumento con una mano, y con la otra se le golpea ó se escurren los dedos por la superficie de la membrana, resultando una vibracion rítmica de esta y de los sonidos producidos por la agitacion de los cascabeles.

El *tambor* ó *caja militar* se compone de un cuerpo ó de una caja de laton ó de metal, cubierta en sus dos extremos por dos pieles tirantes y sujetas con aros que se aprietan más ó ménos con un sistema de cuerdas puestas por

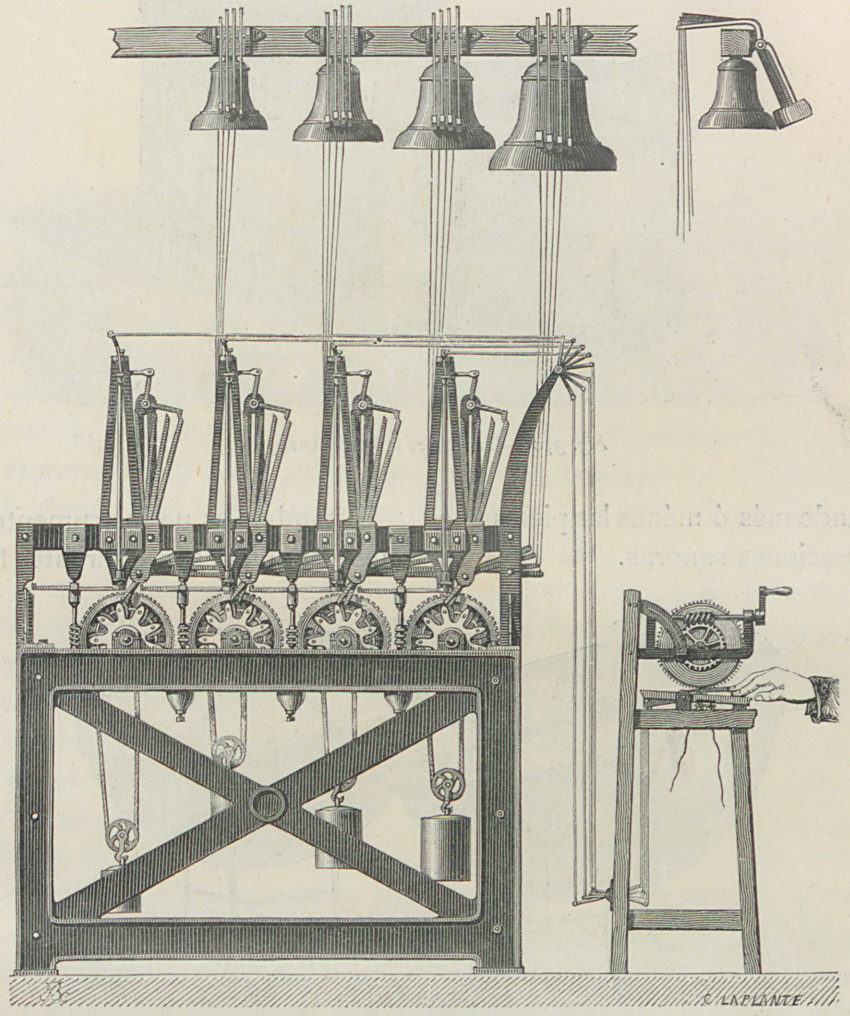


Fig. 368.—Juego de campanas moderno de teclado, en Saint Germain l'Auxerrois

fuera de la caja. La piel superior, la cual se golpea con los *palillos*, es más recia que la inferior, la cual entra en vibracion por efecto de la masa de aire cilíndrica interna. Debajo del tambor hay dos cuerdas de intestinos, aplicadas contra la piel; al vibrar, golpean la membrana y dan al sonido un timbre particular (fig. 370).

Puédense construir tambores cuyos sonidos forman un acorde musical á la tercia, á la quinta y á la octava; para lo cual basta darles dimensiones homólogas en razon inversa de los números 1, $^5/_4$, $^3/_2$, 2, es decir proporcional, por ejemplo, á los números 30, 24, 20 y 15. Como se ve, es la ley de las vibraciones de las columnas de aire encerradas en las cajas de los tambores.

Los *timbales* (fig. 371) son una especie de tambores, con una sola membrana, la cual está sujeta á una caja metálica de forma hemisférica:

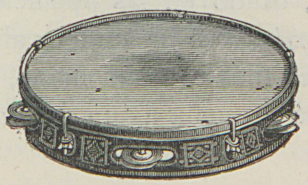


Fig. 369.—Pandereta

la caballería los usaba mucho en otro tiempo. El timbalero llevaba este doble tambor á uno y otro lado detrás del pomo de la silla de su caballo, y lo tocaba golpeándolo con unos palillos terminados en dos muñequillas, «lo cual le

hace despedir un sonido más agradable que si lo golpeasen con palillos de tambor.»

Se han introducido estos instrumentos en las orquestas, pero cuidando de acordarlos ó templarlos á la tercia ó á cualquier otro intervalo musical, á cuyo fin se los construye de varios tamaños y estirando más ó ménos las pieles que producen las vibraciones sonoras.

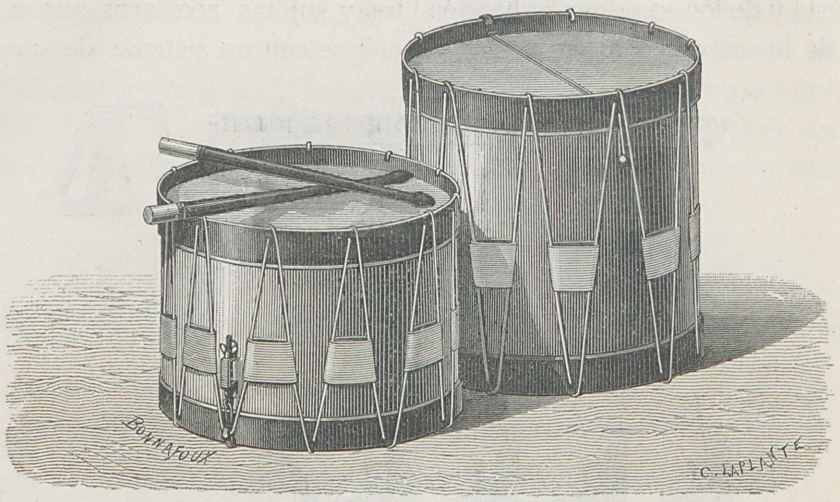


Fig. 370.—Tambores militares europeos

El tambor es un instrumento muy antiguo y muy difundido, con diferentes formas, lo mismo en las naciones civilizadas que en las salvajes. El *tamboril*, usado en las poblaciones rurales de muchos países, es un tambor alto y angosto que el músico toca con una mano, acompañándose con una pequeña flauta, la *dulzaina*. Una de las formas más originales del tambor es la del tamboril japonés, representado en la fig. 372: llámase *hing-ku* y se toca con dos palillos; este instrumento se coloca sobre un doble pié, para que el suelo no intercepte sus vibraciones.

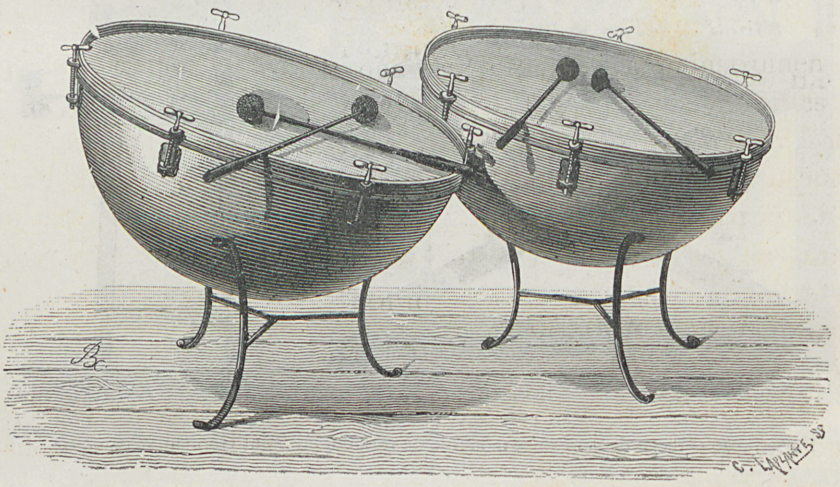


Fig. 371.—Timbales de orquesta

CAPÍTULO III

LOS INSTRUMENTOS DE CUERDA

I

LOS INSTRUMENTOS DE CUERDA EN LA ANTIGUEDAD

Los instrumentos de cuerda se conocen desde remotísima época. Nadie ignora que David tocaba el arpa ante el arca sagrada de los hebreos, y que los sonidos que de ella arrancaba eran bastante melodiosos para impedir que el demonio atormentase á Saul. ¿Era esta arpa el hazur, el kinnor ó el nebel representados en las figs. 373, 374, 375 y 376?

Lo cierto es que se trataba de instrumentos compuestos de una caja sonora de madera ó de metal, que tenia por objeto reforzar los sonidos de las cuerdas tendidas en una de sus caras. El arpa usada por David debia ser un instrumento portátil, puesto que aquel danzaba y cantaba sin dejar de tocarla.

Las liras ó cítaras de los antiguos griegos eran instrumentos análogos á los de los hebreos. Estas liras, que servian principalmente para acompañar las voces de los rápsodas ó de los poetas, se reducian á cuatro, cinco, siete, nueve ó más cuerdas tendidas, que comunicaban sus vibraciones á los soportes ó cajas de varias formas á que estaban sujetas y luégo á las masas de aire contenidas en sus cavidades. Pulsábanse las cuerdas con los dedos ó con el *plectrum*, varilla de marfil ó de madera bruñida que el músico tenia en la mano derecha.

¿Quién inventó la lira? Mercurio, Apolo, dicen los antiguos, que no consideraban digno de más noble orígen un arte tan encantador. ¿Pero Orfeo, tocando la lira, no domesticó las fieras, enterneció á los árboles y las rocas, amansó al Cancerbero y hasta conmovió al inexorable Pluton, cuando sacó de los infiernos á su Eurídice? Dejemos, sin embargo, á un lado la fábula, por ingeniosa y galana que sea, y limitémonos á recordar que los griegos estudiaban la lira, no sólo como artistas y poetas, sino tambien como físicos, porque conocian las relaciones de los intervalos sonoros y de las longitudes de las cuerdas, leyes cuyo descubrimiento se remonta á Pitágoras.

Pasemos ya á los instrumentos modernos, cuya construccion está basada en las vibraciones de las cuerdas sonoras y que, así como los antiguos, son instrumentos compuestos, puesto que los sonidos de las cuerdas, muy débiles cuando aislados, se refuerzan por medio de cajas en las cuales entran simultáneamente en vibracion el aire y las paredes.

Los dividiremos en tres clases, con arreglo al modo de poner en vibracion las cuerdas: colocaremos en la primera los instrumentos de *arco*, cuyo tipo es el *violin;* en la segunda, los instrumentos en que se pulsan las cuerdas, ya con un dedo ó bien con una púa de madera ó de pluma; el tipo de esta serie será el *arpa* ó la *guitarra*, y por último, la tercera serie comprenderá los instrumentos cuyas cuerdas entran en vibracion por el choque de un martillo; estos son los de teclas, y su tipo el *piano*.

Claro está que se podria hacer otra clasificacion, distinguiendo entre los instrumentos cuyas cuerdas tienen longitudes fijas y cada una de las cuales no emite más que un sonido, y aquellos en que se las puede acortar como se quiera, siendo susceptibles de variar, ya de un modo limitado, ó bien indefinidamente, los sonidos que se pueden sacar de ellas en una misma pieza musical. Podríamos asimismo dividir los instrumentos de cuerda con arreglo á la naturaleza de las sustancias que los componen, á los timbres que sus sonidos ofrecen al oído, etc. Pero todas estas divisiones sólo atañen indirectamente á la cuestion de que debemos tratar. Lo que nos proponemos es mostrar los principios de la acústica musical en que está basada la construccion de cada tipo de instrumento.

II

EL VIOLIN

Empecemos por el instrumento de música más perfecto, por el violin.

Como en la mayoría de los de cuerda, hay que considerar en éste dos partes principales por lo que respecta á la produccion de los sonidos; la una formada por el sistema de cuerdas que constituye el cuerpo *sonoro* inicial, el que entra directamente en vibracion por efecto de la percusion ó del frotamiento; la otra parte se compone de una caja hueca en la cual se apoyan las cuerdas y cuyo objeto es reforzar los



Fig. 372.—Instrumentos de música japoneses: el hing-ku

sonidos, dándoles las cualidades de fuerza, suavidad y timbre peculiares al instrumento. Las paredes de la caja y las masas de aire contenidas en ella contribuyen en cierto modo á lograr este resultado. Describamos ambas partes, así como el papel que desempeñan.

La caja sonora del violin se compone de dos tablas casi iguales A B, contorneadas como se ve en la figura 381 y sesgadas en su parte media, para dejar libre paso al arco en sus movimientos á derecha é izquierda. La *tabla inferior* es de madera dura y de grano homogéneo, por lo comun de haya, así como las tablas laterales ó *costados*, que la reunen en todo su contorno con la *tabla superior;* esta es de madera ligera, de abeto ó de cedro, y está reforzada, en su mitad longitudinal y por dentro de la caja, con una chapa de madera C C en la cual se afianza el mango del violin.

La tabla de encima tiene á cada lado y casi á la altura X Y de su parte más estrecha dos aberturas *o o'* llamadas *eses.* Entre estas se pone el *puente*, piececita de madera con dos piés, un tanto calada para disminuir su peso y que sirve para apoyar las cuerdas. Estas están sujetas, por una parte, al *cordal,* pieza adaptada por medio de una cuerda y un boton á la parte más baja de los costados y que lleva cuatro agujeros á los cuales se atan las cuerdas con un nudo; y por otra parte, estas se apoyan en la *cejilla g*, de donde penetran en el hueco del *clavijero* D y se enrollan en las clavijas. Entre

la cejilla y el puente y debajo de las cuerdas está el *diapason f*, pieza convexa de ébano unida al mango y que avanza por cima de la caja sin tocarla. Por último, entre las dos tapas del violin, y casi debajo del pié derecho del puente, es decir, al lado de la prima, hay una piececita de madera cilíndrica *a* que reune las tablas y que se llama el *alma*.

Tal es la caja sonora del violin. El sistema de cuerdas cuya disposicion acabamos de ver

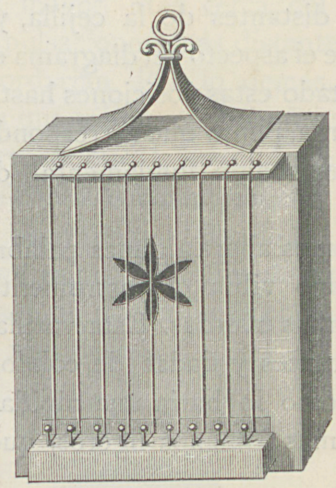


Fig. 373.—Hazur ó asciur de los hebreos

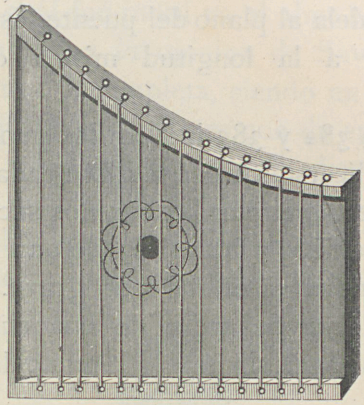


Fig. 374.—Nebel

en el instrumento, se compone de cuatro cuerdas de intestinos de longitud igual, pero de diferente grueso. La más gruesa, situada á la izquierda, está rodeada de un hilillo de cobre plateado, que da á los sonidos producidos por ella un timbre más robusto y más metálico.

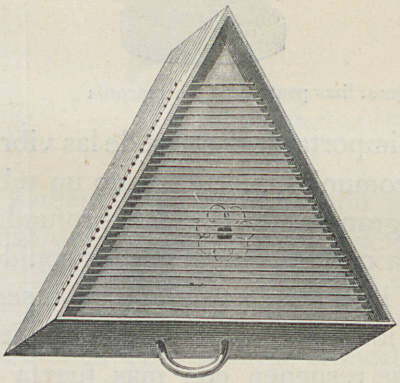


Fig. 375.—Kinnor

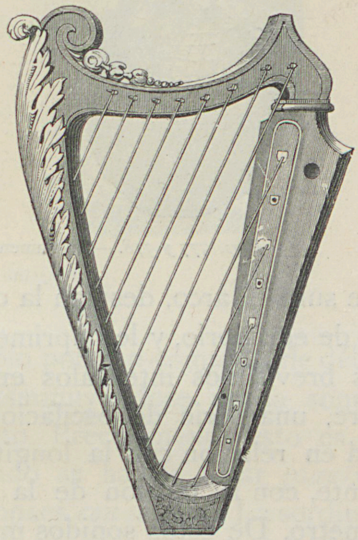


Fig. 376.—Arpa de los hebreos

La más delgada se llama *prima*, y está á la derecha del diapason ó del puente.

Dando más ó ménos vuelta, en un sentido ó en otro, á las clavijas en que se enrollan las cuerdas, se las imprime una tension que hace variar á beneplácito y gradualmente la altura del sonido fundamental, segun las leyes conocidas de las vibraciones de las cuerdas sonoras. Por este medio, se *templa* el instrumento, es decir, que despues de tomar con la segunda cuerda de la izquierda el unísono del diapason que da el *la* (870 vibraciones por segundo), se estiran las cuerdas de modo que den las notas siguientes, de quinta en quinta:

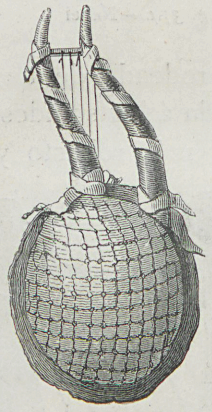
4.ª cuerda ó bordon.	*sol*
3.ª cuerda.	*re*
2.ª cuerda.	*la*
1.ª cuerda ó prima.	*mi*

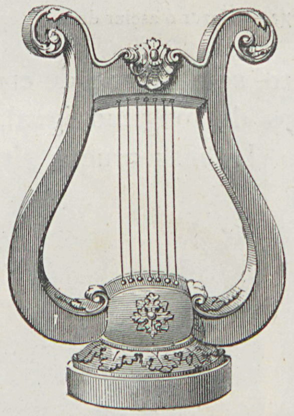
Cuando está ya templado el violin, se le toca sosteniéndolo entre la barba y la clavícula izquierda y apoyando el mango en la mano

derecha, de modo que se pueda aplicar los dedos perpendicularmente sobre las cuerdas á distancias de la cejilla que varían segun el tono de los sonidos que se hayan de producir. Con la mano derecha se coge el arco, con el cual se frotan las cuerdas requeridas, apoyándolo en ellas con más ó ménos fuerza y siempre en direccion paralela al plano del puente, es decir, perpendicular á la longitud misma de las cuerdas.

Las figuras 382 y 383 indican los puntos en que deben aplicarse los dedos sobre cada cuerda, para que estas emitan los sonidos sucesivos (con sus sostenidos y bemoles) de una escala cuya tónica inicial es el *sol* más grave. Claro está que en lugar de pasar de una cuerda á otra (lo cual se hace sin mudar la mano de sitio, sin soltar el mango), se podrian producir los mismos sonidos (por lo ménos los sonidos más agudos que el fundamental de cada cuerda) sobre una sola cuerda avanzando la mano hácia el puente y poniendo los dedos en puntos cada vez más distantes de la cejilla, y así lo hace ostensible el aspecto del diagrama en que hemos representado estas posiciones hasta la mitad de cada cuerda, punto que corresponde á la octava aguda del sonido fundamental de cada una de ellas.

Añadamos ahora algunas palabras acerca del modo cómo vibra el instrumento cuando el arco frota las cuerdas. Esta varilla, provista de crines tirantes y dadas de colofonia, agita la cuerda como lo haria una rápida sucesion de choques más ó ménos ligeros, que, segun que





Figs. 377 y 378.—Instrumentos de cuerda de los antiguos: liras pentacorda y heptacorda

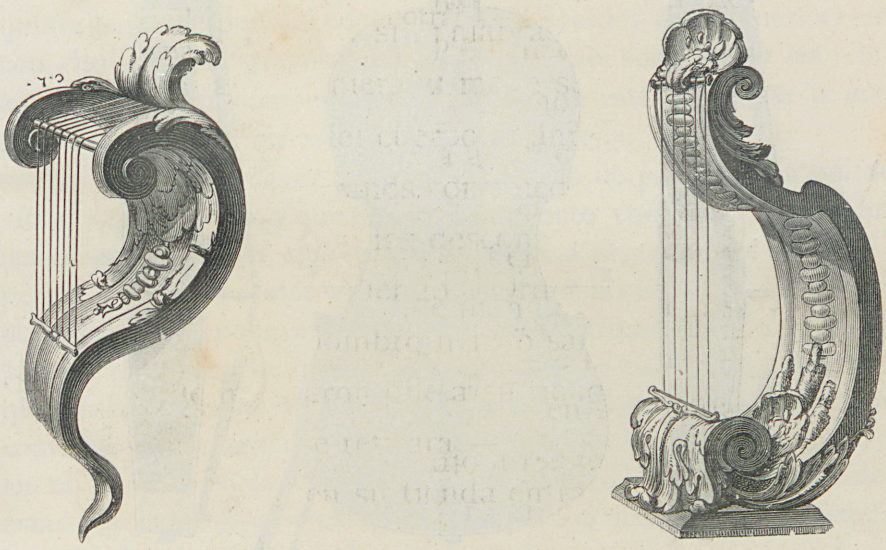
se baje ó se suba el arco, desvian la cuerda de su posicion de equilibrio, y le imprimen, á cada uno de los brevísimos intervalos en que se la deja libre, una serie de oscilaciones cuya rapidez está en relacion con la longitud de la parte vibrante, con la tension de la cuerda y con su diámetro. De estos sonidos múltiples é isócronos resulta uno formado, como ya sabemos, no sólo por la nota principal, sino por todos sus armónicos.

Si la cuerda entrara sola en vibracion entre sus puntos de apoyo que son, por una parte el puente, y por otra la cejilla, ó el dedo que hace las veces de tal, el sonido seria flojo, sin amplitud y sin brillantez. Pero gracias al puente, las vibraciones de la cuerda se trasmiten á la tabla de debajo, y de esta, ya por los costados ó ya por el alma, á la tabla inferior y á todo el instrumento. Además, la masa de aire contenida entre estas dos tablas desempeña á su vez un papel importante á causa de las vibraciones que se le comunican. Actúa como un tubo reforzante de gran seccion y escasa profundidad, lo cual explica que refuerce todos los sonidos emitidos por el instrumento, aunque en la serie indefinida de los sonidos del violin haya siempre algunos que resuenen con más fuerza y amplitud que los otros.

Como se ve, las *eses* son útiles para trasmitir al aire exterior las vibraciones de la masa de aire encerrada en la caja; sin ellas, los sonidos serian sordos. Savart, que ha estudiado detenidamente, haciendo una serie de experimentos célebres, los sonidos del violin, ha reconocido que esta masa de aire debe estar aislada por todos lados; si hacia aberturas en los costados, el sonido se tornaba cada vez más flojo á medida que aquellas eran más anchas, de suerte que las vibraciones de las tablas separadas son insuficientes.

Las vibraciones de la caja sonora del violin y la masa de aire contenida en ella, vibran al unísono, como lo ha comprobado Savart. Sin embargo, tomadas las dos tablas separadamente, deben dar dos sonidos que difieran casi en una segunda mayor. Más cerca del unísono, ocasionarian pulsaciones; más distantes, difícilmente se acordarian. Por lo demás, la tabla superior es la que vibra con más fuerza, y por esto es importante que la madera de que está formada sea fibrosa, elástica y ligera. La tabla inferior, que representa el fondo de un tubo cerrado, no necesita vibrar mucho, por cuya razon se la hace de madera más compacta, ménos fibrosa y más pesada.

El alma del violin es una pieza esencial para la sonoridad y la calidad de los sonidos. Segun Savart, su mision consiste en hacer verticales las vibraciones de la tabla. «Para ver confirmada esta opinion, perforó las dos tablas é hizo vibrar las cuerdas perpendicularmente á aquellas, haciendo pasar el arco por las aberturas, con lo cual fué inútil ya el alma.» Refiriéndose M. Daguin á la opinion de Savart, le parece inexacta ó incompleta, siendo en nuestro concepto justas las razones que da en apoyo de su crítica. «En esta explicacion, dice, no se concibe por qué ha de estar el alma debajo de un pié del puente y no en medio. Si se pusiera otra pieza cilíndrica, otra alma, debajo del otro



Figs. 379 y 380.—Liras ó cítaras de los antiguos

pié, deberia aumentar el efecto, cuando por el contrario, ensordece el violin. Por otra parte, los costados ¿no producirán el mismo efecto que el alma? En virtud de estas consideraciones, creemos que se debe explicar el efecto del alma del modo siguiente: El objeto de esta es dar al pié del puente un punto de apoyo, en torno del cual vibra repercutiendo su otro pié sobre la tabla. Si uno de los piés no se apoyara en un punto fijo, se levantaria miéntras el otro se bajara, porque las cuerdas no actúan perpendicularmente á la tabla, pues el arco las agita con mucha oblicuidad, haciendo así que el puente se mueva en sentido trasversal cuando no tiene punto fijo.»

Esta es tambien la razon de que el puente descanse por dos piés en la tabla. Tiene algunos calados porque si su masa fuese mayor, las cuerdas sólo podrian comunicarle débiles vibraciones, disminuyéndose así la sonoridad del instrumento. Precisamente esto es lo que se hace cuando se ha de tocar *pianíssimo*, y se anota entónces *con sordini*. La sordina aumenta la masa del puente, comunicando á los sonidos del violin, más velados entónces y más sordos, un timbre particular, cierto carácter de melancolía.

Savart, que ha estudiado mucho los instrumentos de cuerda, ha procurado explicarse la influencia de la forma del violin y de la naturaleza de la sustancia de que está construida la caja, y él mismo ha construido un violin trapezoidal, de tablas planas y contornos rectilíneos, que tenia bastante buenas cualidades, musicalmente considerado (fig. 384). Pero los violines de vidrio, de porcelana ó de metal que ha pro-

bado no valen nada. Indudablemente, la ligereza específica de las tablas, la naturaleza fibrosa del abeto, y su elasticidad, son condiciones esenciales para la regularidad y amplitud de las vibraciones. Los instrumentistas más hábiles conocen y aplican por tradicion las reglas del arte: los distintos gruesos de la madera de las tapas en los diferentes puntos de su superficie, su calidad, las proporciones relativas de todas las partes del instrumento, el modo de armarlo, y

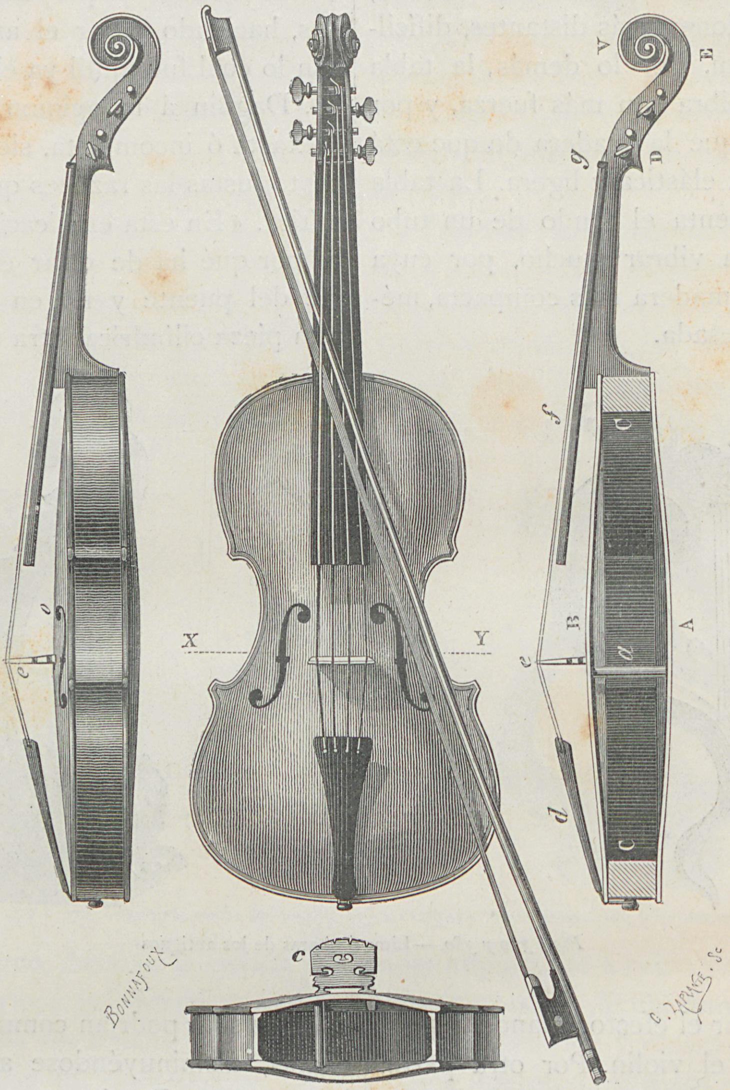


Fig. 381. — Violin: cortes longitudinal y trasversal y vista de frente y de lado

finalmente la clase del barniz aplicado al violin, forman una serie de nociones adquiridas por una larga práctica y múltiples tanteos, cuyo análisis científico seria delicado y prolijo.

La edad de los violines, y el uso prolongado en manos de artistas hábiles, parecen entrar por mucho en sus cualidades: es posible que se desarrolle la elasticidad de las fibras á fuerza de tocar el instrumento con regularidad é inteligencia, opinion de que participan los artistas y en que abundan tambien algunos físicos de mérito como Helmholtz.

Pero tampoco hay que olvidar que la belleza de los sonidos que puede emitir un instrumento de esta clase depende en gran parte del talento del artista que lo toca. Casi toda la habilidad de este por tal concepto reside en el modo cómo su brazo derecho, ó mejor dicho, su mano derecha maneja el arco, y en la limpieza y fuerza con que los dedos de la mano izquierda *pisan* las cuerdas: la pureza de los sonidos, su fuerza, su suavidad, los mil matices que son capaces de emitir, todas esas cualidades maravillosas dependen en cierto modo de la excelencia del instrumento, y ante todo del talento del músico; la expresion, el sentimiento musical, que se agrega á estas cualidades materiales, constituyen el genio de los grandes violinistas.

III

INSTRUMENTOS DE CUERDA DE LA FAMILIA DEL VIOLIN

Cuanto acabamos de decir acerca del violin es aplicable á los instrumentos de la misma familia, instrumentos de varias dimensiones, pero que tienen casi igual estructura exterior é interior, y se tocan, como el violin, con un arco, ó pulsando las cuerdas en los trozos marcados con *pizzicato*.

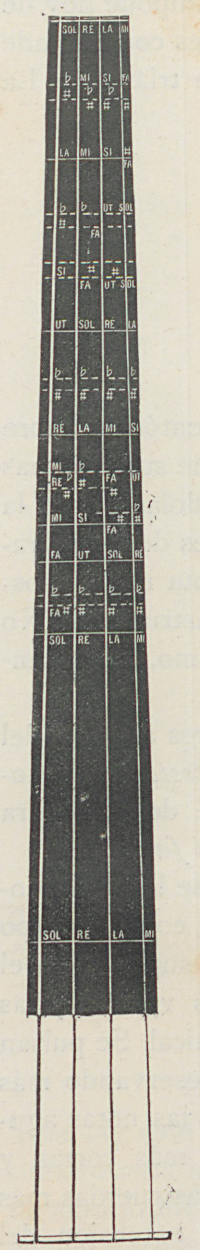


Fig. 382.—Diapason del violin

Tales son: el *alto* ó viola, llamado en otro tiempo alto-viola, que es un violin de tamaño algo mayor, acordado á la quinta bajo el tono del violin, con dos cuerdas graves y dos agudas, que dan, como sonidos fundamentales, *do sol re la;* el *violoncelo*, mucho mayor que el violin y que la viola, y que tiene las mismas cuerdas que esta, pero á una octava más grave; el músico se lo pone entre las piernas para tocarlo, de suerte que el arco funciona en sentido contrario al de su movimiento en el violin y en la viola por estar las cuerdas graves á la derecha del ejecutante en lugar de estar á la izquierda; y por último, el *violon* ó *contrabajo*, mucho más voluminoso y cuyas cuerdas suenan á la octava grave de las del violoncelo. En otro tiempo se tocaba la viola teniéndola apoyada en las rodillas ó sobre una mesa y moviendo el arco como en el violoncelo. Hoy se la pone debajo de la barba como el violin, cuyo juego es enteramente igual. Aquí sólo hacemos mencion de los instrumentos de cuerda y de arco usados en la música moderna y europea. En otro tiempo, los instrumentos de la familia del violin eran más variados y numerosos.

Distinguíanse muchas especies de violas, cuyas cuerdas solian ser en número de seis; el bajo de viola tenia siete cuerdas, y la *viola de bardone* de los italianos, nada ménos que cuarenta y cuatro, pero seguramente no todas podian ser tocadas por el arco. El alto-viola ó quinta y la *viola di gamba* ó bajo de viola son los dos tipos que han subsistido con los nombres de *viola* y de *violoncelo*, únicos que hoy se usan.

IV

LA GUITARRA.—EL ARPA

La guitarra y el arpa son tipos de otra clase de instrumentos de cuerda. Ya no es un arco el que produce en ellos las vibraciones sonoras, sino la pulsacion de los dedos, ó el choque de un pedazo de madera ó de pluma; pero, así como en los instrumentos de la familia del violin, los sonidos de las cuerdas están reforzados por una caja sonora, por las vibraciones de las paredes de esta caja y por la masa de aire contenida en ella.

La falta de puente en la guitarra contribuye, juntamente con el modo de hacer vibrar las cuerdas, á privar á los sonidos de su fuerza y sonoridad, la cual es inferior á la de los sonidos de los instrumentos de arco. De esto resulta asimismo un timbre muy diferente, que da á las piezas tocadas en la guitarra un tinte de ligereza, de suavidad á la par que de melancolía. Por lo demás, es un instrumento más á propósito para el acompañamiento del canto que para los solos.

El número de cuerdas es variable. Cada una de ellas se toca ó se pulsa, ya sueltas, en cuyo caso producen el sonido fundamental, ya acortadas á cuyo fin se apoyan los dedos de la mano izquierda sobre los trastes que hay á trechos convenientes en el mango. El músico toca pues con afinacion si el instrumento está bien templado; pero desafinando, si no lo está; y por este concepto, se ve cuán inferior es la guitarra al violin. Con este último instrumento, un artista que tenga buen oído corrige con su digitacion las variaciones que ocurran en la tension de las cuerdas durante la ejecucion de una pieza. En la guitarra y en los instrumentos cuyas notas están determinadas en las cuerdas por trastes fijos, es imposible remediar dichas variaciones como no se las temple de nuevo.

El *laud*, la *tiorba*, la *mandora* y la *mandolina* son instrumentos que casi han pasado de moda, del mismo género que la guitarra, de la cual

sólo difieren por el tamaño, la forma de la caja sonora, el número de las cuerdas, y el modo de templarlas. Usanse muy poco ó nada en las orquestas; pero el pueblo de los países meridionales suele acompañarse en sus cantos de la guitarra y de la mandolina.

El *arpa*, de cuya antigüedad nos hemos ocupado más arriba, es un instrumento de cuerdas que se hacen vibrar pulsándolas. Por su forma, difiere enteramente del violin, de la guitarra ó de los instrumentos análogos á estos dos tipos. Aun cuando hoy sea poco usada, merece una descripcion especial.

Su construccion era en otro tiempo muy sencilla; pero se la ha perfeccionado mucho en los tiempos modernos. El arpa se compone hoy de tres partes, cada una de las cuales corresponde á los tres lados desiguales de un triángulo. La



Fig. 383.—Diapason del violin: digitacion para la primera posicion

caja ó cuerpo sonoro es un conjunto de ocho tablas ensambladas y encoladas, sobre las cuales hay otra de abeto con cierto número de agujeros en forma de rosetones. A esta tabla se sujetan las cuerdas con otros tantos botoncitos;

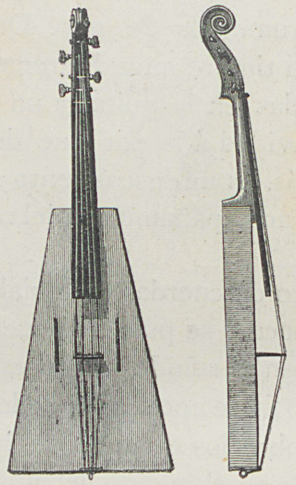


Fig. 384.—Violin trapezoidal de Savart

y por su extremo opuesto se fijan á la *consola*, de forma más ó ménos contorneada, que constituye el lado superior del triángulo. Las cuerdas están enrolladas allí en sus respectivas clavijas merced á las cuales se puede templar el instrumento.

A la parte inferior de la caja ó del pié del arpa, van á parar ciertas varillas metidas en el tercer lado del triángulo. Cada varilla corresponde en el pié á un pedal que el músico baja cuando es necesario. La varilla está unida por el otro extremo á unas palancas que hacen funcionar unos ganchos exteriores cuando se la levanta; estos ganchos oprimen entónces sobre unos trastes todas las cuerdas, que suenan unas á la octava de las otras, acortándolas así en la proporcion requerida por las leyes de las vibraciones sonoras para que cada nota resulte sostenida en toda la extension del instrumento. No es difícil comprender el mecanismo, examinando la figura 389.

El arpa tiene siete pedales: tres al lado del pié izquierdo, que sirven para *sostener* las notas *si do re*, y cuatro al del pié derecho para hacer lo propio con las notas *mi fa sol la*.

Para tocar este instrumento, se lo ha de poner el artista entre las piernas, con el cuerpo sonoro apoyado por su extremo superior en el hombro derecho, con lo cual las varillas y las cuerdas estarán en posicion vertical. Se pulsan las cuerdas con ambas manos, reservando más particularmente la derecha para las notas agudas, es decir, para las cuerdas más cortas, y tocando con la mano izquierda las cuerdas más largas, es decir, los bajos. La extension del arpa era generalmente de 4 $^1/_2$ á 5 octavas, dadas por 32 ó 35 cuerdas, desde el *si* de las graves (que corresponden al primer *si* del contrabajo) hasta el *la*, que está al unísono del *la* (cuerda suelta) del violin. Pero las arpas actuales tienen 42 y hasta 46 cuerdas, y por consiguiente tanta extension como los pianos de seis octavas. La pureza, suavidad y extension de los sonidos de este instrumento hacen que se lamente que haya caido en desuso, pues hoy sólo se ve el arpa en manos de los músicos ca-

llejeros, siendo escasísimos los arpistas de talento.

Así como la guitarra ó la mandolina son los instrumentos predilectos de los pueblos meridionales, de Italia ó de España, el arpa es el instrumento nacional de los países del Norte, y sobre todo de Irlanda. «Los galeses tienen un instrumento nacional llamado *telyn;* el cual es un arpa que presenta la particularidad de tener tres filas de cuerdas. La del medio corresponde á las teclas negras del piano (sostenidos y bemoles). Se toca el *telyn* apoyándolo sobre el hombro izquierdo y con la mano izquierda.» (*Viaje al país de Gales*, por A. Erny.)



Fig. 385.—Instrumentos de la familia del violín: viola, violoncelo y contrabajo

Vese por este párrafo que el arpa galesa es de construccion mucho más sencilla que la descrita anteriormente, pues la fila de cuerdas de enmedio hace inútil el mecanismo de los pedales, varillas y palancas de la consola; en cambio el mayor número de cuerdas hace la digitacion más complicada.

V

EL PIANO

De los instrumentos de cuerda en que el frotamiento del arco ó la pulsacion de los dedos produce las vibraciones, pasemos á aquellos en que unos martillos puestos en movimiento por *teclas*, hieren las cuerdas. Tal es el *piano*, hoy tan en boga, el instrumento por excelencia de las mujeres, ménos fatigoso que el arpa, y más fecundo en recursos musicales, pero no superior á esta en cuanto á la belleza de los sonidos.

En el piano hay tres partes principales que considerar; la caja sonora, las cuerdas y el mecanismo de las teclas y de los martillos.

La caja varía de forma segun la disposicion general del instrumento y del teclado, que puede ser horizontal ó vertical, y en el primer caso, longitudinal ó trasversal. Como esta disposicion no es en rigor esencial, nos limitare-

mos á hablar de la preferida por los artistas, porque es más favorable para la sonoridad, y describiremos el piano llamado *de cola*, cuya caja tiene la forma de un largo triángulo, parecido á un arpa puesta horizontalmente (figura 390).

La caja sonora es de madera, por lo comun de roble, y en el interior de sus paredes hay una tabla delgada de abeto, formada de varios pedazos, encolados y ensamblados; es la tabla de armonía que desempeña en el piano el mismo cometido que la tabla ó tapa superior del violin, de abeto tambien. Esta tabla es la que recibe la primera impresion de las vibraciones

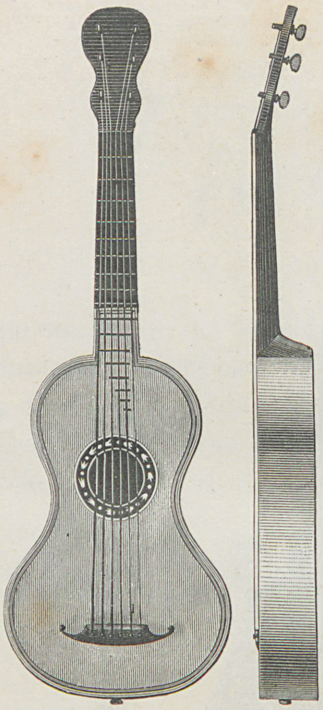


Fig. 386.—Guitarra

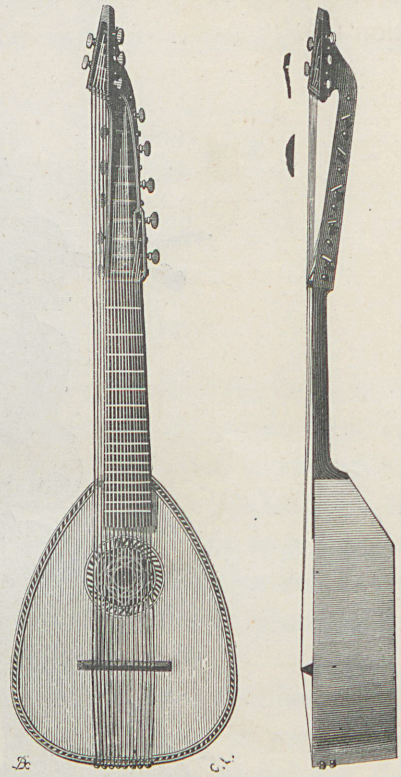


Fig. 387.—Tiorba

sonoras excitadas en las cuerdas, y sus fibras son las que comunican estas mismas vibraciones á la caja del piano y sobre todo á la masa de aire contenida en él.

Encima de la tabla de armonía y paralelamente á su plano, están tendidas las cuerdas en un marco de hierro reforzado con barras tambien de hierro, que mantienen su rigidez é impiden la deformacion que podria resultar de la tension de las cuerdas. Este marco se compone de una serie de cuerdas metálicas cuya longitud y grueso están en relacion con la altura y volúmen del sonido que se desea producir. Cada sonido lo emite una doble cuerda para las octavas graves, y tres de ellas para las octavas de los sonidos graves ó agudos.

Unas y otras son de acero; pero las graves están rodeadas de hilillos de cobre rojo ó plateado. Como se ve, estas combinaciones se ajustan á las leyes de las vibraciones longitudinales de las cuerdas, por las cuales sabemos que los números de estas vibraciones, es decir, los tonos de los sonidos emitidos por una cuer-

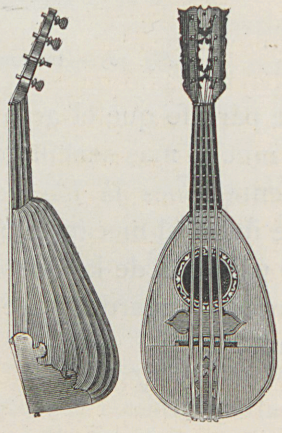


Fig. 388.—Mandolina

da son inversamente proporcionales á su longitud, á su diámetro y á la fuerza que las tiende.

El instrumento está construido de manera que deja á la entera disposicion del afinador

uno de estos elementos, es decir, la tension de cada cuerda. Con un pequeño instrumento de hierro, con una llave, el afinador templa cada cuerda de modo que produzcan la serie de los sonidos de la escala diatónica y cromática, lo cual se suele hacer por via de comparacion de quinta en quinta, y exige un oído finísimo y cierta habilidad, porque hay que tener en cuenta la proporcion (1).

Supongamos, pues, efectuada esta operacion indispensable: el piano está afinado, y todas las series de cuerdas sucesivas templadas de modo que vibran al unísono de las notas que componen las seis á siete de su teclado, con sus sostenidos y bemoles. ¿Cómo se pone ahora una ó muchas cuerdas en vibracion?

Todos sabemos que esto se consigue apoyando los dedos de cada mano en teclas de marfil y de ébano colocadas horizontalmente; y teniéndolas bajas más ó ménos tiempo en sentido vertical. Pero no todos conocen el mecanismo que produce las vibraciones sonoras, las detiene ó prolonga cuanto se quiera, las atenúa ó les da toda su amplitud. Veamos pues en qué consiste este mecanismo que en realidad es muy sencillo.

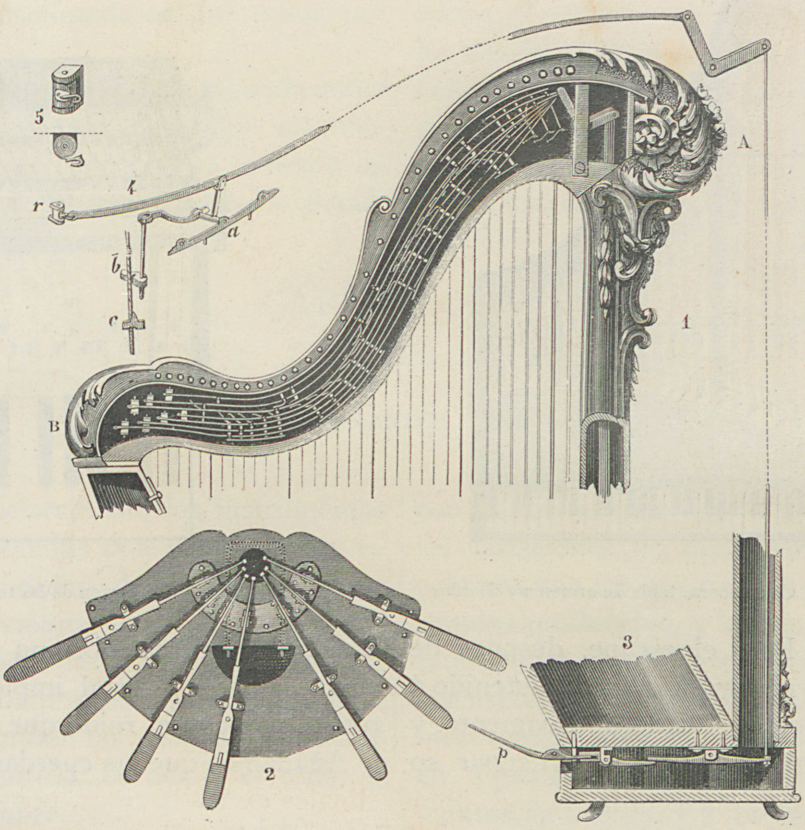


Fig. 389.—Mecanismo del arpa. Consola y pedal: AB, corte de la consola, palancas de los pedales, tirantes y resortes; 2, pedales; 3, mecanismo de un pedal *p*; varilla; 4, *a*, árbol que se mueve bajo la accion del tirante, y hace mover á su vez la uña *b* del gancho apoyándola contra la cejilla *c*; 5, resorte ó muelle que coloca los tirantes en su posicion anterior cuando cesa la accion del pedal.

Debajo de las cuerdas hay otros tantos martillos *m m* que, cuando cada tecla se halla en reposo, están alineados unos junto á otros á cierta distancia de la cuerda doble ó triple que corresponde á cada uno de ellos (fig. 391). Si se baja una tecla, es decir, el brazo de palanca que la constituye, el otro brazo se levanta; el martillo correspondiente se alza bruscamente en sentido vertical y choca con la respectiva cuerda, que entra en vibracion de resultas de este choque. Digamos ahora cómo se efectúa este movimiento del martillo, y cómo cae despues del choque sin rebotar ni hacer ruido. La figura 392 nos hará comprender todo el mecanismo. Sigamos para ello la serie de efectos que suscita el movimiento de descenso de la tecla.

(1) Se han hecho muchas tentativas para dar al piano la serie entera de los sonidos de la gama enarmónica, pero no sabemos que hayan tenido éxito. Esto es enojoso porque, al menos en nuestro concepto, la inferioridad musical del piano sobre los instrumentos como el violin se debe en gran parte á la necesidad de la proporcion, que hace que el piano sea un instrumento falso, rigurosamente hablando.

La multiplicidad de las teclas no es suficiente. ¿No vemos á los organistas tocar con cinco teclados? Por último, sin aumentar el número de teclas, ¿no se podria obtener distintamente con un juego de pedales, como en el arpa, los bemoles y sostenidos de cada nota?

ab es la cuerda sonora, AOB la tecla movible alrededor del punto O: bajándola en B (ó en B'), el brazo de palanca O A se levanta, hace que se alce á su vez un escape G que va á dar en el extremo *e* del mango *t* del martillo M' y da en la cuerda, que resuena por efecto

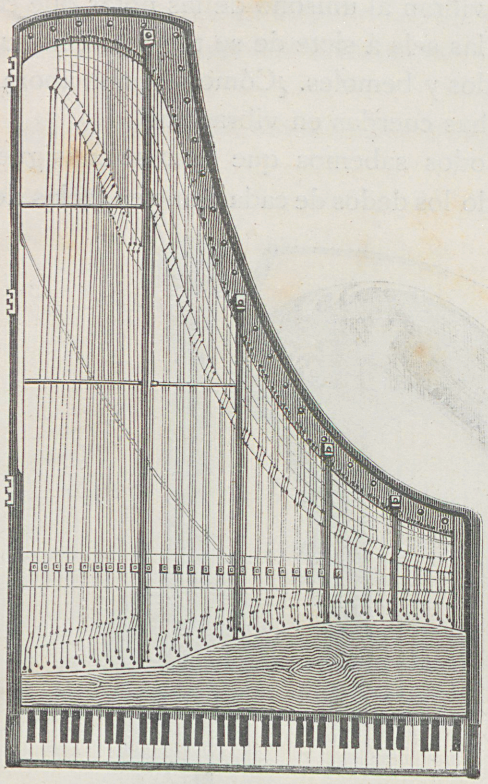


Fig. 390.—El piano. Caja sonora: tabla de armonía y cuerdas

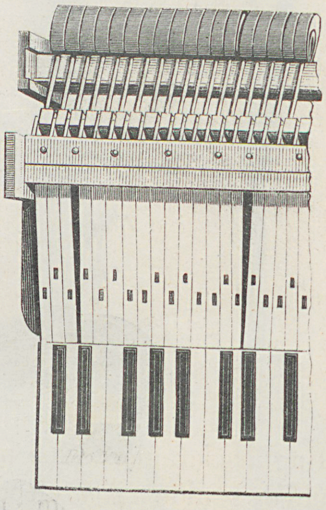


Fig. 391.—Colocacion de las teclas y de los martillos

de la percusion. Pero el escape, despues de levantar un tanto el martillo, queda detenido á su vez por un boton situado oblicuamente, y se aparta del martillo, que vuelve á ocupar su posicion primitiva sobre un puentecillo H, llamado la *silla*, el cual impide que el martillo rebote y apaga el ruido que pudiera hacer.

Añadamos que las cuerdas que forman cada

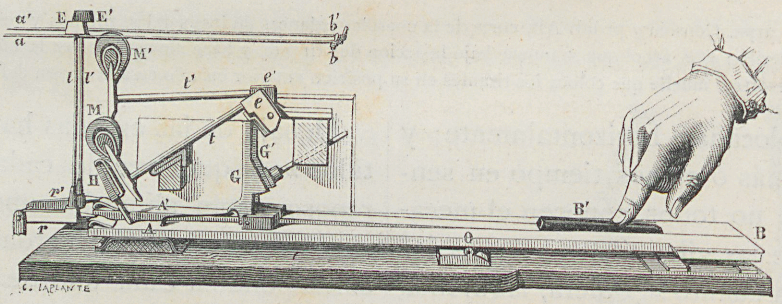


Fig. 392.—Mecanismo de los martillos y de las teclas

nota y que reciben á la vez el choque del martillo cuando el dedo baja una tecla, continuarian resonando despues del golpe si no estuvieran provistas de unas piececitas de madera forradas de fieltro E E', llamadas *apagadores*. Tan luégo como el dedo se apoya en una tecla, la varilla *l* levanta el apagador E, como se ve en E' *l'* y la cuerda vibra; si el dedo sigue apoyado en la tecla continúa levantado, pero cae y extingue la vibracion sonora, tan luégo como el dedo suelta la tecla.

Réstanos decir por qué mecanismo se puede aumentar ó disminuir la intensidad del sonido con los pedales. Uno de estos comunica por medio de una palanca con todo el sistema de apagadores; cuando se apoya el pié en él, una varilla vertical actúa sobre este sistema y todos los apagadores se levantan á la vez, dando por

resultado que cada nota se prolonga y emite un sonido más intenso; además comunica sus propias vibraciones á sus armónicos, de suerte que aumenta considerablemente la sonoridad del instrumento. Por el contrario, si el músico baja el otro pedal, se comunica al teclado un ligero movimiento de izquierda á derecha; cada martillo no da más que en una ó dos de las tres cuerdas que forman el sonido, cuya intensidad resulta así disminuida en uno ó dos tercios.

El piano data solamente de la segunda mitad del siglo XVIII. No es otra cosa sino el *clavicordio* perfeccionado, instrumento oriundo de Italia, de donde se le importó en los demás países europeos. El clavicordio solia tener varios teclados; pero lo que lo distinguia del piano moderno era el modo cómo entraban las cuerdas en vibracion. Acabamos de ver que en el piano las hace resonar la percusion de un martillo; en el clavicordio, las teclas movian unas piececitas de madera provistas de una punta de pluma de cuervo, la cual pulsaba las cuerdas. Así es que los sonidos de este instrumento no tenian el mismo carácter, el mismo timbre que los del piano; eran más flacos, más estridentes, ménos blandos, y de una sonoridad ménos suave é intensa. La *espineta* era una especie de pequeño clavicordio, con una cuerda por tecla: era la forma primitiva del clavicordio.

CAPÍTULO IV

LOS INSTRUMENTOS DE VIENTO

Para distinguir claramente los instrumentos de música cuyos sonidos son efecto de las vibraciones de las cuerdas, de los que se llaman instrumentos de viento, hay que considerar, no tan sólo el modo de producirse el sonido, sino tambien la naturaleza del cuerpo cuyas vibraciones determinan las cualidades musicales del sonido emitido, es decir, el tono, la intensidad y el timbre.

Acabamos de ver que, por lo general, el cuerpo sonoro de los instrumentos de cuerda no sólo se compone de cuerdas vibrantes, sino tambien de una caja de metal y de la masa de aire en ella contenida. Así pues, la cuerda sola, por su grueso, longitud, tension, y por la sustancia de que está formada, produce el tono ó altura musical del sonido y en parte su timbre. La caja y el aire, que entran tambien en vibracion cuando se pulsa, frota ó golpea la cuerda, no intervienen sino para reforzar el sonido producido, pero sin modificar su tono; asimismo ejercen gran influencia en el timbre, haciendo que prepondere tal ó cual de los armónicos del sonido fundamental, pero careciendo de influencia apreciable en el tono musical.

En los *instrumentos de viento* que vamos ahora á describir, el cuerpo sonoro, la masa vibrante es una columna de aire cuya forma varia con la de las paredes en que está contenida; las variaciones de dimension y forma de esta columna son las que causan las del tono de los sonidos producidos, y las paredes del tubo no intervienen sino para modificar la sonoridad ó intensidad de estos sonidos. Así pues, por esto mismo es ya muy diferente el modo de producir aquellos, del que se emplea en los instrumentos de cuerda. En los de viento, es la columna de aire la que se ha de hacer vibrar, lo cual se consigue imprimiendo un movimiento vibratorio á una porcion de dicha columna, situada por lo comun en uno de los extremos y provista de un aparato ó embocadura que facilita la vibracion. Estas se producen y se comunican al aire contenido en el instrumento, por una insuflacion de los labios del músico ó por un fuelle acústico mecánico. De aquí tiene orígen el nombre de instrumentos de viento que se ha dado á estos instrumentos de música.

Su forma, dimension y mecanismo varian mucho: y los hay construidos de madera, de metal, y hasta de vidrio ó cristal. Mas para clasificarlos lo más racional es distinguirlos por la especie de embocadura que los caracteriza. Así pues, los dividiremos en instrumentos de música de embocadura de *flauta*, cuyos tipos son el de este nombre ó los tubos de órgano

que nos han servido para estudiar las vibraciones de las columnas gaseosas (fig. 393); siguen luego los de *lengüetas batientes ó libres:* el *clarinete* y el *oboe* son los dos tipos principales de esta serie; y por fin, los instrumentos de viento de embocadura de bocal: la *trompa*, la *trompeta* y la mayor parte de los de cobre.

Para resumir esta variedad de instrumentos musicales, describiremos por fin el *órgano*, que viene á ser la síntesis de los de viento, puesto que en él se hallan reunidos todos los tipos, todos los timbres, desde los sonidos más graves y estridentes á los más agudos ó suaves.

I

INSTRUMENTOS DE EMBOCADURA DE FLAUTA.— EL CARAMILLO, LA FLAUTA, EL PÍFANO

La figura 393 muestra en qué consiste la embocadura de flauta, y cómo se producen las

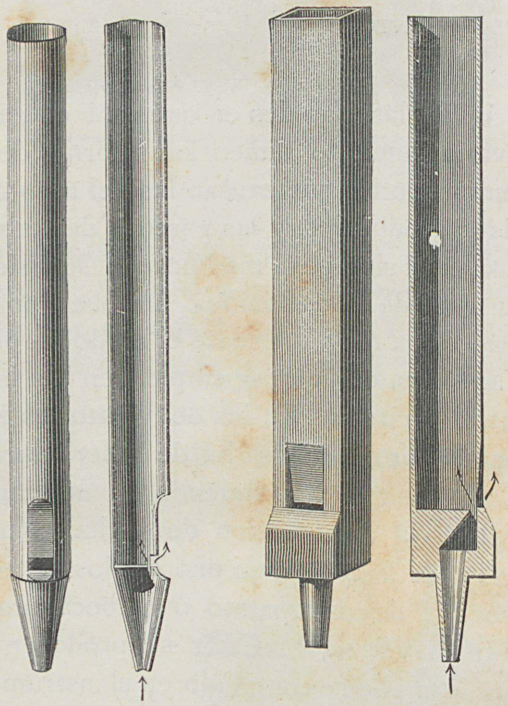


Fig. 393.—Tubos de órgano de embocadura de flauta

vibraciones de la columna de aire por la insuflacion. La corriente empujada por el soplo va á dar contra las paredes cortadas á bisel y se divide en ellas en dos, una de las cuales actúa sobre la columna interior haciéndola entrar en vibracion, siendo el movimiento vibratorio la consecuencia de las compresiones y reflexiones sucesivas de las capas de aire en la arista del bisel.

Recordaremos que si se hacen vibrar las columnas de aire encerradas en tubos de escasa seccion, relativamente á su longitud, los tonos de los sonidos que resultan son sucesivamente proporcionales á las longitudes de los tubos. Esto es tan cierto para los tubos cerrados, los que llevan el nombre de *contras* en el órgano, como para los abiertos. Sólo que el sonido fundamental de dos tubos de igual longitud es, en el tubo abierto, la octava superior del sonido fundamental del cerrado. Además de este sonido, los tubos sonoros producen, cuando se da creciente intensidad al soplo ó al fuelle acústico, los armónicos sucesivos representados por los números 1, 2, 3, 4, etc., en los tubos abiertos, y los armónicos impares 1, 3, 5, del sonido fundamental en los cerrados.

Bastan estas leyes para la inteligencia de los fenómenos de acústica musical que presentan los instrumentos de viento, y de las reglas á que obedece la construccion de cada uno de ellos. La forma y la materia de que se componen los tubos, la clase de embocadura y el modo de tocarlos, no hacen más que modificar el timbre de los sonidos producidos, su intensidad, su suavidad, y por fin esas cualidades que en su mayoría dependen de la habilidad de los artistas, pero que la física no puede analizar.

Los *pitos*, los *caramillos* y los *pífanos* son los instrumentos de embocadura de flauta más sencillos. En los dos primeros hay adaptado un tubo más ó ménos largo á esta embocadura que se parece enteramente á las representadas más arriba, salvo que la extremidad está cortada de modo que penetre cómodamente entre los labios del que toca alguno de estos instrumentos (fig. 394).

El tubo tiene cierto número de agujeros, practicados en puntos que corresponden á los nodos de la columna gaseosa interior. Cuando los dedos del músico tapan todos estos tubos, los sonidos producidos son el fundamental y todos sus armónicos 2, 3, 4, es decir, la octava superior, la tercia sobre esta octava, la doble octava, etc. Levantando sucesivamente los dedos por un órden conveniente, se obtienen los sonidos intermedios de la escala natural: los sostenidos y bemoles se producen tapando á medias los agujeros.

La embocadura de la flauta y del pífano es

un agujero oval de bordes cortados á bisel, y por el cual se introduce el viento con los labios. Estos instrumentos difieren de los tres anteriores en que la corriente de aire que produce las vibraciones sigue una direccion trasversal á la del tubo.

Se hacen flautas de madera de ébano ó de boj, de marfil y de cristal. El número de agujeros y el de las llaves que sirven para abrirlos ó taparlos, varía segun los instrumentos. En la figura 395 se representan dos distintas flautas. La flauta que en el siglo pasado se llamaba *travesera* para distinguirla de la flauta de pico (especie de caramillo hoy en desuso), era mucho más sencilla; no tenia más que siete agujeros y su extension no excedia de tres octavas.

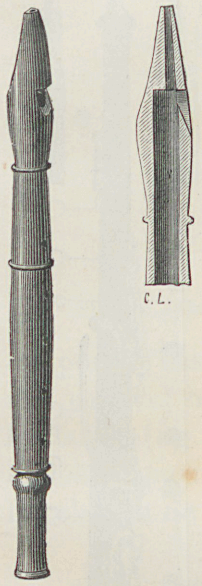


Fig. 394.—Pito

Los pífanos ó flautines son flautas pequeñas, de seis agujeros, cuyos sonidos vivos y agudos descuellan sobre el conjunto de la pieza que se toca. Por lo comun se los usa en la música militar.

La invencion de la flauta se remonta á la más apartada antigüedad.

Hace algunos años que se la ha encontrado en su forma más sencilla entre los restos de la época neolítica y de la edad del rengífero.

En Grecia y Roma figuraban los flautistas en todas las fiestas y ceremonias públicas ó privadas, religiosas ó profanas. Los actores usaban en las funciones teatrales flautas dobles, cuyos dos tubos desiguales tenian una embocadura comun; el uno emitia los sonidos graves y el otro los agudos. La *flauta de Pan* ó *siringa* era un instrumento formado de siete tubos de caña desiguales; soplando sucesivamente en cada uno de ellos resultaba una serie de sonidos, una especie de escala.

II

INSTRUMENTOS DE LENGUETA Ó ESTRANGUL.—EL CLARINETE, EL OBOE, EL FAGOT

Dase el nombre de *lengüeta* á una lámina elástica que se pone en el orificio de los tubos sonoros para recibir la accion de la corriente de aire productora del sonido.

Esta lámina ó plaquita *a b* (fig. 396), esta adaptada á la parte anterior de la abertura de una pieza hueca *c d* de madera ó de metal, llamada *canal*. La lengüeta cierra la canal cuando se aplica exactamente sobre sus bordes: cuando no lo está, y se mantiene separada de estos en su posicion normal, da paso al aire. Por lo

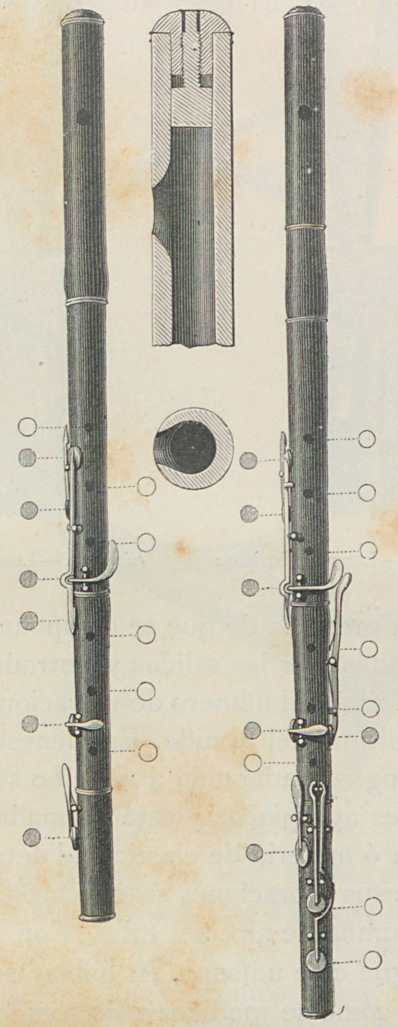


Fig. 395.—Flauta (seccion longitudinal y trasversal de la embocadura)

demás, con una planchuela metálica *m*, ó sea la *raseta* que se hunde más ó ménos bajando la varilla *t*, se puede aumentar ó disminuir la longitud de la parte libre de la lengüeta. Esta parte libre es la que, gracias á su elasticidad, entra en vibracion por efecto del viento y comunica su movimiento á la columna gaseosa del tubo sonoro.

Esta especie de lengüeta se llama *batiente*.

La *lengüeta libre* (fig. 397) se adapta exactamente á la abertura de una cajita prismática que comunica con la boca del tubo. Puede oscilar fuera y dentro de esta abertura, haciendo á una y otra parte movimientos de amplitud

igual, en lo cual difiere principalmente la lengüeta libre de la batiente, cuyos sonidos son más duros y chillones.

¿Qué es lo que produce el sonido en la lengüeta? No lo producen las vibraciones de la

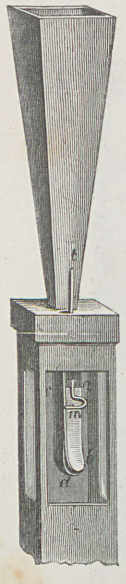


Fig. 396.—Lengüeta batiente

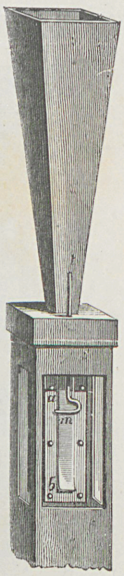


Fig. 397.—Lengüeta libre

sustancia metálica de que se compone, sino las engendradas por las salidas y entradas periódicas del aire. El número de vibraciones determina la altura del sonido. Es menester, pues, que la lengüeta adaptada á un tubo sea de dimensiones apropiadas y esté formada de una sustancia ó materia de elasticidad determinada para que sus vibraciones sean isócronas con las de la columna de aire del tubo. Con la raseta se consigue este unísono. Al hablar del órgano veremos cómo se modifican los sonidos producidos por las lengüetas, añadiendo á los caños nes unos tubos de varias formas llamados *trompetillas armónicas.*

Digamos ahora una palabra acerca de los instrumentos de música cuyos sonidos se obtienen con lengüetas de formas algo diferentes de las que tienen las adaptadas á los tubos de órgano, pero que vibran del mismo modo.

En primer lugar mencionaremos el *clarinete,* cuya embocadura se compone de una laminilla de caña adaptada á una boquilla de boj, ébano ó marfil, que el músico hace vibrar soplando por el interior de la pequeña abertura que las separa. Los labios del músico son los que, oprimiendo con mayor ó menor fuerza los dos lados de la boquilla del instrumento, hacen las veces de raseta y producen un movimiento vibratorio más ó ménos rápido.

Los sonidos emitidos por el tubo cuando vibra en toda su longitud, es decir, cuando los dedos del músico tapan todos los agujeros, forman la serie natural de los armónicos de los tubos abiertos. Así como en la flauta, se obtienen los sonidos intermedios de las escalas diatónicas y cromáticas abriendo sucesiva ó simultáneamente los agujeros, ya levantando los dedos ó ya bajando las *llaves* ó válvulas del instrumento. El tubo del clarinete termina en

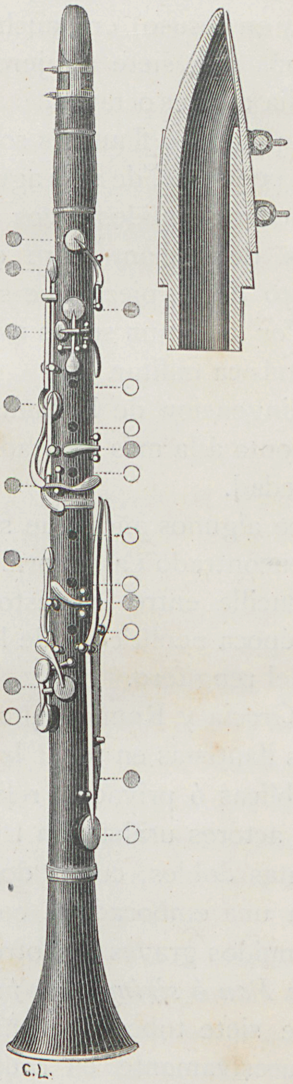


Fig. 398.—Clarinete (seccion de la boquilla)

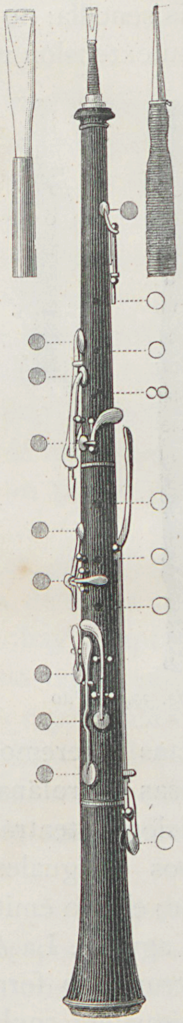


Fig. 399.—Oboe (boquilla vista de frente y de lado)

una especie de pabellon poco ancho, como se ve en la fig. 398.

La lengüeta del *oboe* se compone de dos laminillas de caña aplicadas una contra otra por sus bordes con sus concavidades de frente. Introducidas en la boca del artista, vibran por efecto de la corriente de aire producida por la

insuflacion, dependiendo la longitud de la parte vibrante del modo cómo los labios oprimen las láminas elásticas (fig. 399).

El *fagot* es un instrumento del mismo género que el oboe, pero formado de tubos de mayor volúmen y que produce sonidos á una quinta bajo la octava inferior de los del oboe. El fagot es, comparado con este, lo que el violoncelo respecto del violin.

III

INSTRUMENTOS DE VIENTO DE BOCAL Ó EMBOCADURA DE TROMPA

La embocadura de los instrumentos de viento que nos resta examinar, se compone simplemente de un tubo de forma cónica ensanchada por su base, ó de un tubo terminado en una cavidad hemisférica que se aplica contra los labios (fig. 400). El movimiento vibratorio de los mismos labios es el que se comunica á la columna de aire contenida entre las paredes del tubo que constituye el cuerpo sonoro del instrumento. Estas vibraciones pueden ser más ó ménos rápidas, segun que el artista apriete la boca contra la abertura y que la corriente de aire que de ello resulta ofrezca una seccion más ó ménos estrecha. Se requiere gran práctica para proporcionar exactamente las dimensiones de esta abertura, la velocidad y la fuerza de la corriente, al tono de los sonidos que se quieren obtener, en una palabra, para hacer vibrar los labios al unísono del sonido fundamental del instrumento y de sus armónicos. Esto es lo que se llama *tener buena embocadura*.

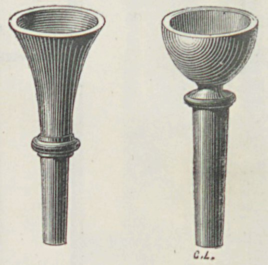


Fig. 400.—Embocaduras de los instrumentos de metal

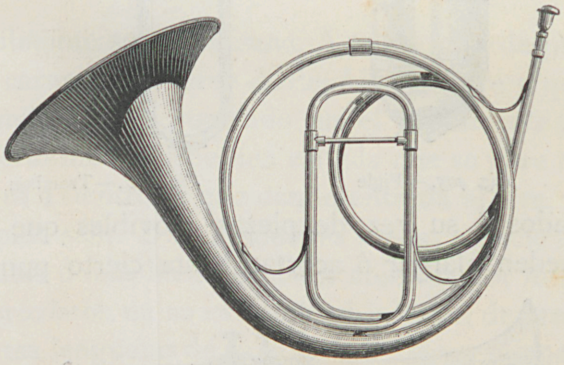


Fig. 401.—Trompa

El tipo de los instrumentos de viento de embocadura de trompa es el de este nombre, que consiste en un tubo cónico retorcido en espiral y terminado en una ancha parte muy abierta llamada el *pabellon*. La *trompa de caza*, la *trompeta* y el *clarin* son instrumentos del mismo género que la trompa, y que sólo difieren entre sí por el volúmen de la columna de aire, por la forma más ó ménos retorcida del tubo, y finalmente por las dimensiones del pabellon (figs. 401, 402, 403 y 404).

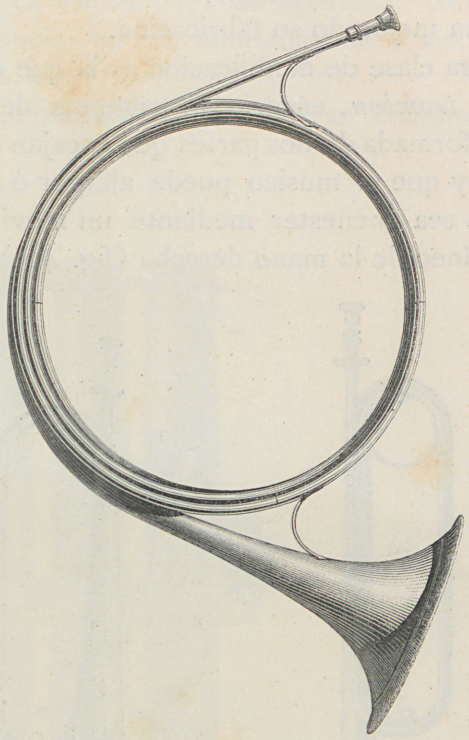


Fig. 402.—Trompa de caza

Los sonidos que estos instrumentos producen son los armónicos del fundamental, y se obtienen segun hemos dicho más arriba. Mas para que resulten las notas intermedias de la escala es preciso tapar con la mano, más ó ménos cerrada, la abertura del pabellon, no careciendo de dificultad el obtener de este modo sonidos bien justos y puros, pues la obstruccion de dicha abertura les quita gran parte de su limpieza y sonoridad. Por esto se ha tratado de aumentar los recursos musicales de los instrumentos de cobre modificando de varios modos

las longitudes del tubo sonoro ó de la columna de aire puesta en vibracion. A este fin se han abierto en sitios adecuados de las paredes metálicas de los instrumentos, agujeros provistos de llaves que se pueden abrir ó cerrar como se quiera. Tal es el *figle* (fig. 405), el bajo de los instrumentos de cobre, y toda la familia de los de llaves, como los *saxofones*, así llamados del nombre del fabricante que los ha inventado ó que ha mejorado su fabricacion.

Otra clase de modificacion es la que se nota en el *trombon*, especie de trompeta de corredera formada de dos partes que encajan una en otra, y que el músico puede alargar ó acortar como sea menester mediante un movimiento rectilíneo de la mano derecha (fig. 406).

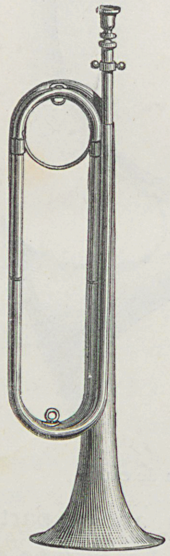


Fig. 403.—Trompeta

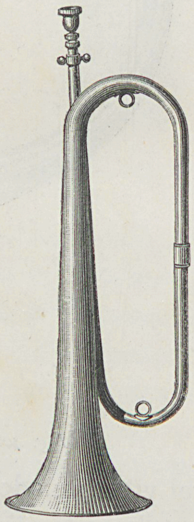


Fig. 404—Clarin

Por último, la tercera clase es la de los instrumentos de piston, como el *cornetin*, tan conocido hoy en las orquestas, y sobre todo en las bandas militares (fig. 407). Los pistones no son otra cosa sino porciones de tubos en número de dos ó tres, que penetran á frotamiento en partes cilíndricas que comunican con el tubo retorcido del instrumento. Tienen unas aberturas laterales que corresponden con los apéndices destinados á aumentar la longitud de la columna vibrante. Segun que el piston esté bajado ó levantado, las aberturas en cuestion se colocan delante de las de los apéndices, ó se hallan en contacto con una parte maciza: la comunicacion se abre ó se cierra como se puede ver en las figs. 408 y 409, que representan un corte de los cilindros que contienen los pistones y el sitio que estos ocupan al bajarlos. Por lo demás, el músico baja uno ó dos de estos, ó bien los tres juntos. Los apéndices están for-

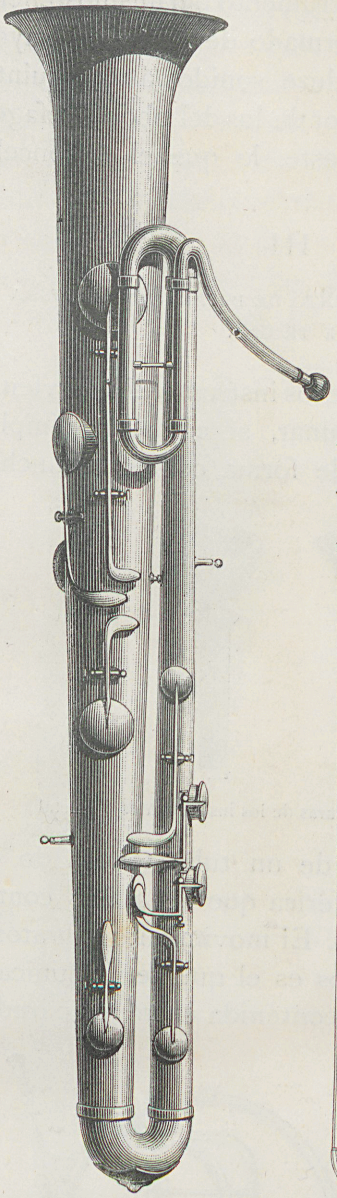


Fig. 405.—Figle

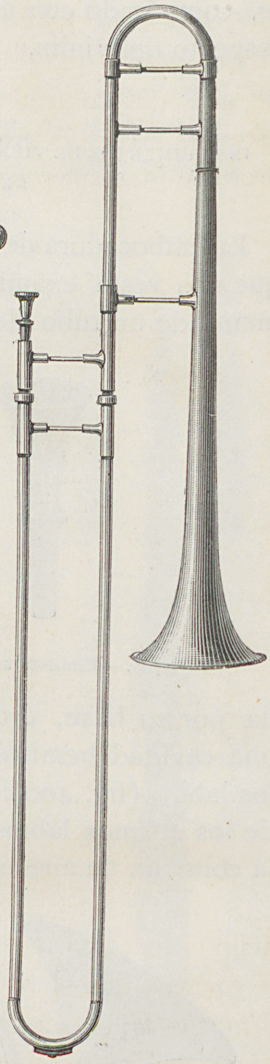


Fig. 406.—Trombon

mados á su vez de piezas movibles que se pueden alargar ó acortar hasta cierto punto.

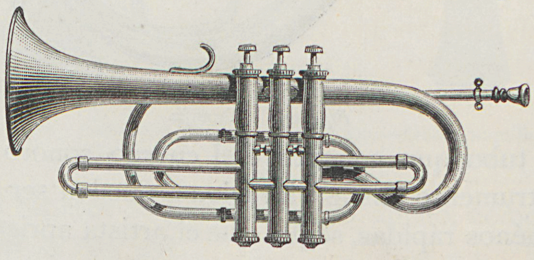


Fig. 407.—Cornetin de pistones

Por último, la pieza del tubo del instrumento á la cual se adapta la embocadura se alarga más ó ménos, segun el tono del trozo musical que se ha de tocar. De este modo se puede

afinar el instrumento con toda la precision necesaria.

IV

LA GAITA

En todos los instrumentos de viento que acabamos de reseñar, los labios del músico introducen por las embocaduras la corriente de aire, el viento que pone en vibracion la columna de aire del tubo del instrumento. Antes de estudiar el órgano, en que un fuelle acústico produce mecánicamente dicha corriente, debemos decir unas cuantas palabras acerca de un instrumento campestre en que el aire, cuya presion hace vibrar las lengüetas, se almacena en un saco de piel con el cual comunican las embocaduras de los tubos sonoros.

Este instrumento es la *gaita* (fig. 410), conocida ya de los antiguos romanos con el nombre de *tibia utricularis*, pero hoy solamente en uso en algunas apartadas comarcas de Francia, en las montañas de Escocia, de Galicia, etc.

Examinando el grabado, se comprenderá

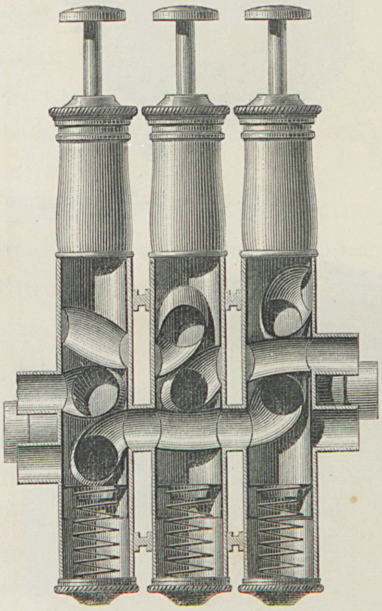


Fig. 408.—Corte de los pistones levantados

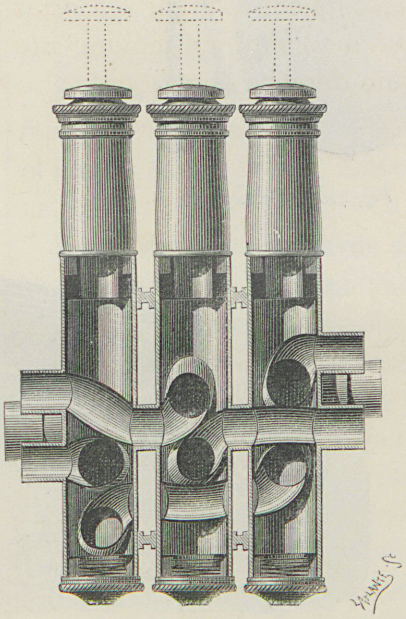


Fig. 409.—Pistones bajados

fácilmente su mecanismo. A es un saco de piel de carnero que sirve de depósito de aire y que el músico infla soplando en el *portaviento* C; interiormente tiene una válvula que se abre de fuera á dentro, y que dando entrada al aire, le impide salir. B E F son tres tubos, especie de flautas ó más bien de oboes abiertos por fuera y provistos, en su extremidad interior, de otras tantas lengüetas de caña. B y F llevan el nombre de *grande* y *pequeño roncon*, y resuenan á la octava uno de otro. Las flautas E y F llevan agujeros que emiten sonidos intermedios entre los fundamentales y sus armónicos.

Cuando el gaitero ha inflado la gaita, que sujeta entre su cuerpo y el brazo derecho, la aprieta con el codo y hace así que el aire salga por las lengüetas que vibran haciendo resonar las flautas. Mediante la pulsacion de los dedos, se obtienen los sonidos variados cuyo conjunto forma la pieza musical con su acompañamiento. Por otra parte, el músico ha podido acordar préviamente las flautas, que son movibles en sus cajas, de suerte que se las puede alargar ó acortar hasta cierto punto.

La figura 411 es una gaita perfeccionada, cuyas flautas C D están provistas de llaves, como los instrumentos que ya hemos estudiado, consistiendo su roncon E en un cilindro que contiene una serie de tubos con lengüetas interiores. Algunos de estos tubos están encorvados dos veces, de modo que emiten sonidos tanto más graves cuanto mayor es la longitud total.

Las correderas que sobresalen y que se llaman *cajoncillos*, pueden correr á lo largo del roncon y con ellas se tapa enteramente ó se cierra más ó ménos una hendidura que corresponde con la abertura de cada tubo. El roncon

es el que emite los acordes de acompañamiento en esta gaita.

Otra diferencia esencial que la distingue de la gaita anterior, es que el músico no infla con la boca el instrumento por el portaviento B, sino manejando un fuelle representado en la

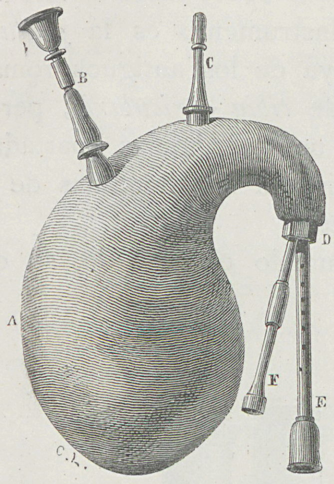


Fig. 410.—Gaita

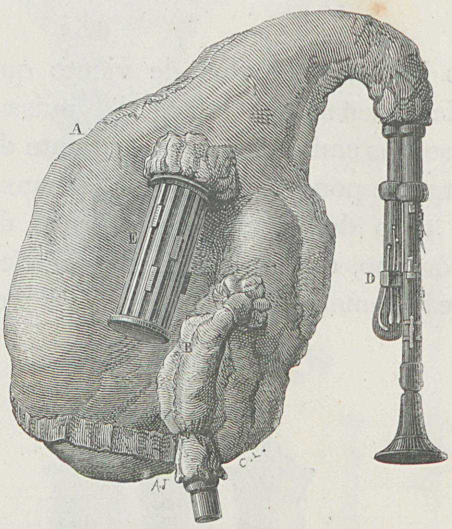


Fig. 411.—Gaita perfeccionada

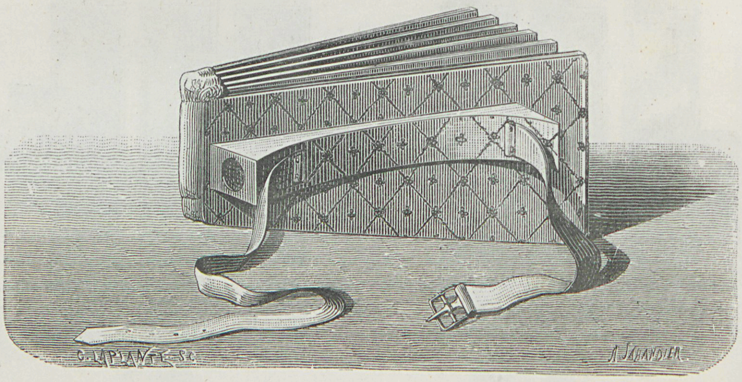


Fig. 412.—Fuelle para dar aire á la gaita perfeccionada

figura 412, que se ajusta á la embocadura del portaviento y que el músico lleva sujeto á la cadera derecha.

Esta gaita tuvo gran boga en el siglo XVII, en las ciudades lo mismo que en los campos; mas, á pesar de la originalidad y de la elegancia de su forma y de la profusion de los adornos con que se la engalanaba, la moda habia abandonado ya este instrumento, bastante ingrato por cierto, cuando á fines del reinado de Luis XIV se desarrolló y refinó el gusto por la música, y hoy no es más que un recuerdo.

CAPITULO V

EL ÓRGANO

I

OJEADA HISTÓRICA.—LOS TUBOS SONOROS Y LOS REGISTROS DE ÓRGANO

El órgano es el más potente, el más grandioso y completo de todos los instrumentos. Así lo indica su nombre (*organon* en griego, el instrumento por excelencia); pero, á decir verdad, es más bien una reunion de instrumentos de viento que uno particular. A causa de la variedad de sus timbres y de la extension de sus voces, desde los bajos más graves hasta las notas más agudas de los sopranos, constituye por sí solo toda una orquesta.

No se sabe con certeza la fecha de la invencion del órgano. La tradicion la hace remontar al siglo VIII, porque en 757 fué cuando apareció el primer órgano en las basílicas cristianas de Occidente. Dícese que el emperador griego Constantino Coprónimo envió este instrumento á Pepino el Breve, el cual lo mandó instalar en una iglesia de Compiegne. Pero mucho ántes de dicha época, los romanos se servian de un órgano conocido con el nombre de *órgano hidráulico*, porque la presion del agua era la que producia el movimiento del aire en los tubos. Hasta el siglo quinto no sustituyeron los fuelles al procedimiento primitivo, y entónces los órganos neumáticos reemplazaron en las iglesias á los hidráulicos, cuya humedad, efecto del uso del agua, alteraba y deterioraba muy pronto los tubos y el mecanismo.

El órgano es un instrumento de viento compuesto de una serie de tubos de dimensiones, formas y embocaduras diferentes, y puestos en vibracion simultánea ó sucesivamente por el viento enviado por un fuelle. Vamos á describir sucintamente las varias partes del mecanismo con el cual produce el organista los efectos musicales propios de tan maravilloso instrumento.

La parte puramente instrumental ó musical del órgano comprende un número indeterminado de tubos sonoros clasificados por series, segun sus timbres; cada serie se llama un *registro*, y los diferentes tubos que componen uno de ellos, no difieren, como se ve, sino en el tono de los sonidos que cada cual emite cuando el viento de los fuelles lo hace resonar. Un registro de órgano es, hablando con propiedad, uno de los instrumentos particulares que entran en la composicion del trozo musical que se ejecuta. Así es que el organista hace resonar muchos á la vez, observando las leyes de la armonía, segun sus propias inspiraciones ó las del compositor cuya música toca.

Mencionemos algunos de estos registros tal como se los construia á fines del siglo pasado, haciendo observar que, aparte de sus denominaciones particulares, se les aplica otras basadas en la longitud del mayor de sus tubos, del que da la nota más grave, longitud que se expresaba en piés. Así tenemos:

La *cara*, de 16 piés (se hacen de 8 y de 32), cuyos tubos son de estaño;

El *bordon*, de 16 piés, cuyos tubos de dos á tres octavas son de madera y cerrados, al paso que las notas superiores las emiten tubos de plomo;

La *bombarda*, de 16 piés, de estaño ó madera; es un registro de lengüeta: los registros anteriores son de embocadura de flauta;

La *topadilla* (de 4 piés) es el primer registro del órgano sobre el que se hace la afinacion;

El *nazardo*, que suena á una octava sobre la topadilla;

La *quincena*, que es la octava superior de la topadilla (por consiguiente, de 2 piés);

El *larigó*, octava superior al nazardo, registro hoy suprimido.

Siguen luégo los registros de *corneta*, *llenos*, *trompeta;* despues la *voz humana*, el *cromorno*, el *clarin*, la *voz celeste*, octava de la voz humana, etc.

Estos diversos registros se componen de tubos cuyas embocaduras varian, segun hemos dicho, así como las longitudes, calculadas con arreglo á las leyes de las vibraciones sonoras de los tubos abiertos ó cerrados, y tambien así como las formas. Los tubos de madera son prismáticos ó en forma de pirámides truncadas de base cuadrada; los tubos de estaño ó de aleacion compuesta de una parte de plomo y otra de estaño, son de forma cilíndrica, ó cónica que termina en punta, y tambien de forma cónica ensanchada á modo de pabellon. En la figura 393 se puede ver la del bordon de 16 piés y la de la cara de igual longitud. En la 413 están representadas las de los tubos de varios de los registros citados anteriormente: los hay abiertos, cerrados totalmente, y por fin tubos de chimenea, es decir, cerrados en parte. Los tubos cerrados de madera se afinan por medio de una muñeca de cuero que tapa la abertura superior, introduciéndola más ó ménos y modificando así la longitud de la columna vibrante. Los tubos de plomo se afinan las más de las veces con *orejas*, placas de plomo flexibles soldadas á cada lado de la luz. Por último, para afinar los tubos de lengüeta se usa la raseta, alargándose ó acortándose con ella la longitud de la placa metálica vibrante que está aplicada contra la abertura.

No todos estos registros son de igual extension musical, esto es, no todos ellos constan de igual

número de tubos cada uno de los cuales da una nota de la escala. Así es que partiendo de la *topadilla*, que comprende cuatro octavas, dos agudas y dos graves, se encuentra la *flauta*, el *clarin*, la *voz celeste*, de la misma extension que la topadilla. Todas las cornetas, *corneta magna*, *corneta de expresion*, *corneta de eco*, comprenden cada una dos octavas, desde la primera bajo el tono hasta la primera, segunda y tercera sobre él. La *voz humana*, el *cromorno*, la *trompeta*, el *bordon* de 8 piés, dan cuatro octavas, tres graves y una aguda. La *bombarda*, la *cara* y el *bordon* de 16 piés tienen cuatro octavas graves.

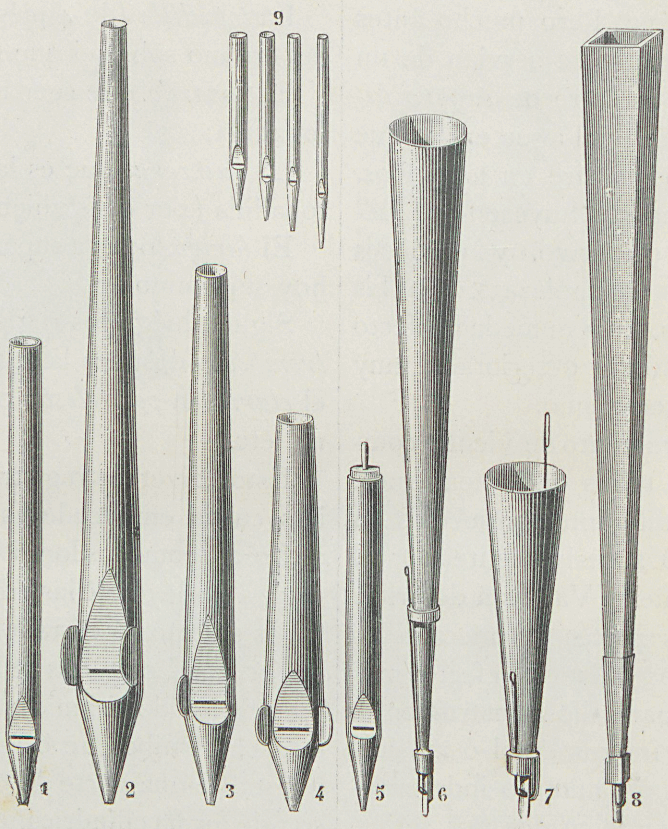


Fig. 413.—Tubos de órgano: 1, topadilla; 2, gran nazardo; 3, nazardo; 4, corneta; 5, flauta; 6, trompeta; 7, voz humana; 8, bombarda; 9, llenos

Los registros que acabamos de reseñar corresponden á los órganos que se construian á fines del siglo pasado; y añadiendo cinco registros de pedal, se reunia, para un órgano completo, un conjunto de 30 registros diferentes. Posteriormente se ha aumentado mucho este número; el órgano de Harlem, uno de los más famosos que existen, tiene 60 registros y 5,000 tubos; los de Liverpool y Ulm, 100 registros cada uno. Pero el más completo por este concepto es el gran órgano de San Sulpicio en Paris, cuyos registros ascienden á 100 y el de los tubos sonoros á 7,000.

II

MECANISMO DEL ÓRGANO.—FUELLES Y PORTAVIENTO.—REGISTROS.—TECLADOS, PEDALES

Conocida ya la parte instrumental ó puramente musical del órgano, réstanos hacer ver cuál es la disposicion de los tubos sonoros, cómo y por qué mecanismo el músico los hace resonar sucesiva y simultáneamente, de modo que emitan los efectos melódicos y armónicos de la pieza que toca, y en fin, cómo emplea tal ó cual registro á su eleccion.

Para mayor órden y claridad, describamos ante todo el conjunto.

Los tubos de los distintos registros están puestos verticalmente en una armazon de carpintería más ó ménos adornada y de dimensiones variables, que se llama *caja* ó *armario del órgano*. Por lo comun este es doble y se compone por delante de un pequeño órgano llamado *positivo*, y por detrás del *gran órgano:* entre uno y otro están los *teclados*. Por lo regular se coloca en la parte más alta del armario del gran órgano una tercera parte más pequeña que el positivo, y que tiene sus registros correspondientes: es el

que contiene los juegos ó registros del órgano más apropiados para ejecutar los solos.

El viento pasa á los tubos desde unos *fuelles* movidos á brazo, pero que se podrian hacer funcionar por un sistema motor cualquiera. El aire, más ó ménos comprimido, va desde los fuelles á los canales llamados *porta-vientos*, y de allí á los canales de los *sommiers*. Dase este nombre en francés, y por extension en castellano tambien, á unas cajas sobre las cuales están colocados los tubos que forman los diferentes registros ó juegos del órgano. Moviendo con unos botones puestos al alcance de la mano del organista, unas piezas llamadas *registros*, el viento se pone en comunicacion con este ó el otro juego; si entónces el músico baja algunas teclas, un mecanismo particular abre las válvulas puestas debajo de la abertura de los tubos. Estos resuenan entónces emitiendo los sonidos correspondientes á las notas ó á las teclas.

Ocupémonos ahora en particular de las partes del órgano que hemos revistado, para que

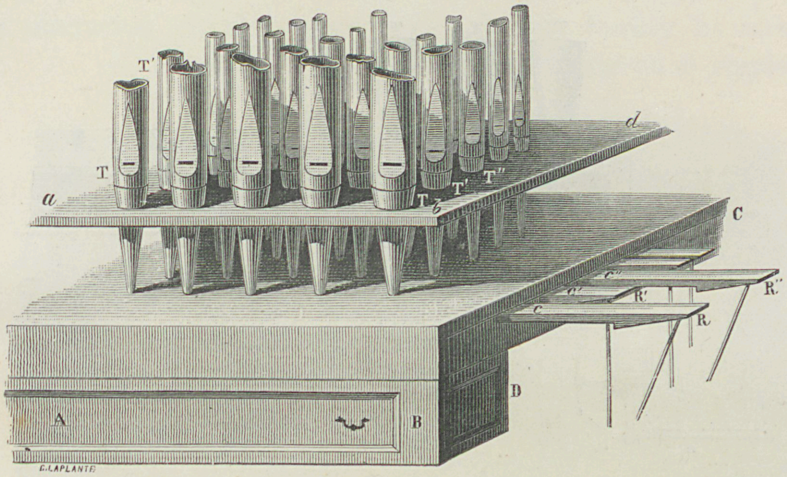


Fig. 414.—Sommier provisto de sus tubos

el lector pueda formarse una idea clara del modo cómo funciona este inmenso aparato musical.

ABC (fig. 414) es un *sommier*, en el cual hay colocadas verticalmente muchas series de tubos sonoros TT'T″ por filas paralelas TT'; cada una de estas filas constituye un registro. Las aberturas de los tubos penetran por su pié en el interior del *sommier*, cuya tabla superior se llama *chapa*. Otra tabla, el *falso sommier*, *abc*, situada un poco más arriba de sus embocaduras los mantiene derechos.

El viento va á parar desde los fuelles, por los porta-vientos, al interior de una especie de caja ABD situada dentro del *sommier* y en su parte inferior; esta caja se llama *secreto*. Ahora nos resta decir cómo puede pasar el aire del secreto á los tubos. Para esto, hay en la tapa superior del *sommier*, además de la chapa cubierta de agujeros en que encajan los tubos, una serie de ranuras, cada una de las cuales corre á lo largo de los tubos de un mismo juego, estando separadas entre sí por listones paralelos llamados *registros durmientes*. El fondo de estas ranuras tiene agujeros situados verticalmente debajo de los tubos del juego. Por último, otro liston movible, tambien taladrado, puede correr en cada ranura; es el *registro* CR, C'R', C″R″..... Ahora bien, cuando el registro está abierto, es decir, cuando el organista ha tirado del boton correspondiente al juego que desea hacer resonar, todos los agujeros del registro se ponen enfrente de los de la chapa y de las ranuras que corresponden al juego, y por lo tanto el viento puede llegar á la abertura de cada tubo. Pero resonarian á la vez todos los tubos de un mismo juego, si una disposicion especial no cerrase el paso del viento para todos los tubos que no corresponden precisamente á la nota ó notas cuyas teclas baja el organista. Con tal objeto, la parte inferior del *sommier*, está formada de compartimientos, ó mejor dicho, de unas ranuras trasversales particulares. Cada una de estas (AB, fig. 415) comunica con el secreto L, que contiene el viento, por una válvula S, de modo que si esta válvula está abierta, el viento penetra en la ranura correspondiente. Como cada ranura corresponde

á una nota, es decir, á todos los tubos de los diferentes juegos susceptibles de emitir dicha nota, el viento que penetra en ella por la válvula abierta, no hará resonar más que el tubo ó los tubos de los juegos cuyos registros están abiertos.

El teclado del órgano es semejante al del piano, con la diferencia de que cada órgano tiene varios teclados. Al bajar una tecla con el dedo, el organista hace mover, gracias á un mecanismo muy sencillo, unas varillas *d* que, articuladas con una palanca acodada, abren las válvulas y llevan así el viento á las ranuras de los *sommiers*; si suelta la tecla, el muelle *r* cierra la válvula. Aparte de los teclados tocados por las manos del organista, los hay de pedales que corresponden con juegos particulares pues tos en movimiento con los piés.

Para reasumir, supongamos al organista sentado ante los teclados: los fuelles funcionan y por consiguiente el aire está á la presion necesaria en los portavientos.

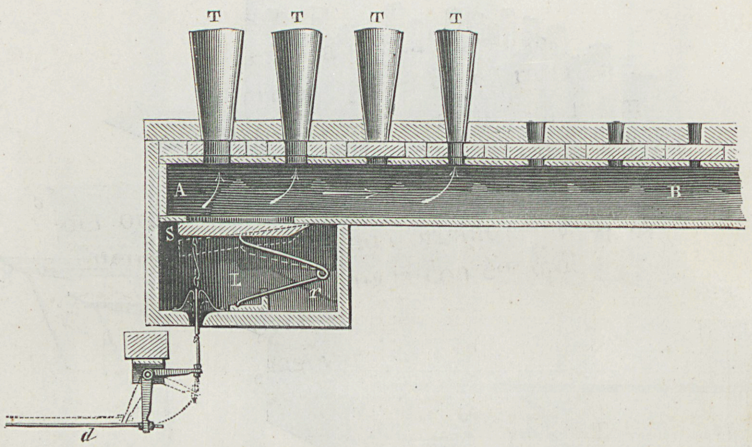


Fig. 415.—Corte trasversal del *sommier*. Secreto y válvula

El organista empieza por preparar los registros de que quiere servirse para tocar la pieza musical que tiene á la vista; lo cual hace sacando los botones que están á su alcance alrededor del teclado. Los listones ponen en movimiento una serie de palancas que abren los registros correspondientes.

Hecho esto, no resuena aún ningun tubo, aun cuando los secretos de los *sommiers* están ya llenos del viento pronto á desempeñar su cometido donde sea menester. El organista baja una tecla de alguno de los teclados, y al punto se abre una de las válvulas del interior del secreto de un *sommier*, el viento penetra en la ranura correspondiente y de allí pasa á los tubos cuyos registros están abiertos; lo propio sucede si baja con el pié cualquier pedal. A partir de este momento el órgano está en accion, y las melodías, así como los acompañamientos armónicos, brotan de su seno á gusto del ejecutante.

Para describir el órgano y su mecanismo, nos hemos atenido á su construccion tal como era á fines del siglo pasado y tal como la describe con minuciosos detalles la gran *Enciclopedia* de d'Alembert y Diderot, fundándonos para ello en que muchos de los órganos que hoy existen están formados con arreglo á este modelo. Pero ya se comprenderá que de un siglo á esta parte los constructores de órganos han introducido perfeccionamientos de detalle en relacion con los progresos de la industria y del arte desde aquella época.

El mecanismo de tan maravilloso instrumento es hoy más regular, más seguro, y ha ganado en extension, en poder y en sonoridad, como podrá deducirse de ciertos detalles relativos á los órganos recien construidos en Francia, los más notables de los cuales son sin disputa los de San Dionisio, Nuestra Señora y San Sulpicio en Paris.

Digamos ante todo una palabra acerca de los fuelles. Hé aquí lo que se lee con respecto á este punto en el dictámen oficial sobre el gran órgano de Nuestra Señora:

«El juego de fuelles se compone de un gran fuelle de alimentacion, de doble recipiente, con cuatro pares de bombas que pueden suministrar

unos 400 litros de aire por segundo, y de otro fuelle de fuerte presion con dos pares de bombas que dan 200 litros de aire por segundo. Además de los cuatro grandes depósitos reguladores puestos cerca de los *sommiers* á los que alimentan, hay en el interior del órgano dos grandes depósitos reguladores de fuerte presion, otros cuatro para el solo, el gran coro y las partes superiores del teclado del positivo y de la bombarda, y un gran número de recipientes de aire diseminados por toda la extension del órgano, y provistos de muelles para evitar cualquier alteracion en la presion del viento.»

Se comprenderá la utilidad de todos estos depósitos, que contienen lo ménos 25,000 litros de aire comprimido, si se tiene en cuenta que hay tubos que no consumen más de un centílitro de aire por segundo, al paso que los de 52 piés absorben 70 litros en el mismo tiempo.

Hemos visto cuán sencillo es el mecanismo que sirve para comunicar el movimiento de las teclas á las válvulas que corresponden con una serie determinada de tubos. A pesar de esto la resistencia que el organista tenia que vencer le causaba un cansancio que el mecanismo inventado por Barker ha aliviado en gran parte. Consiste este en el empleo de un fuelle motor

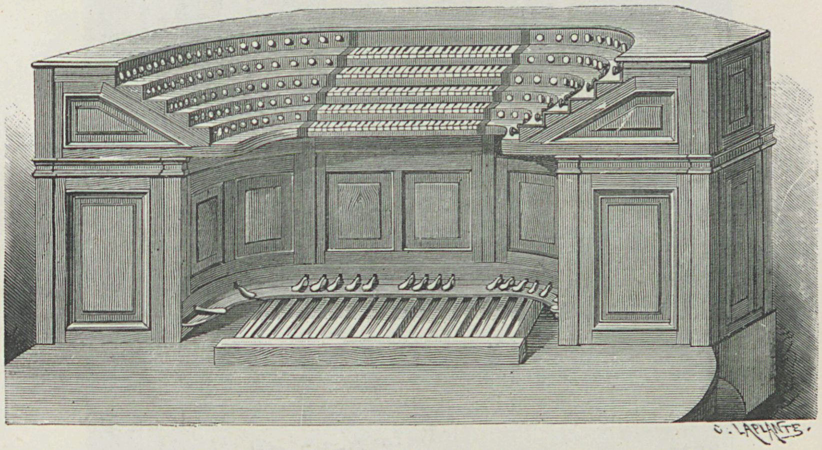


Fig. 416. — Teclado del gran órgano de Nuestra Señora de Paris

interpuesto entre la tecla y la válvula mencionada, y que puesto en relacion con el sistema de fuelles por medio de un porta-viento y una válvula especial sobre la cual actúa la tecla, se infla y ejerce el esfuerzo suficiente para vencer la resistencia de la válvula situada en el *sommier*, de suerte que el dedo del organista no ejerce ya su esfuerzo en la válvula de ancha superficie, sino en la valvulita de alimentacion del fuelle-motor.

M. Cavaillé-Coll ha perfeccionado todavía este mecanismo, teniendo además la feliz idea de aplicar su principio al manejo de los registros y reduciendo así el trabajo mecánico del organista, con lo cual podrá éste fijar más su atencion en lo que es del puro dominio del arte.

Tambien se ha aumentado considerablemente el número y variedad de los juegos en los órganos recien construidos. El de Nuestra Señora tiene cinco teclados de mano y uno de pedal. Hé aquí el número de juegos y de tubos que hace resonar cada uno de estos teclados:

Teclado de pedal. . . .	16 juegos	480 tubos
— de gran coro. . .	12 —	672 —
— de gran órgano. .	14 —	1088 —
— de bombarda. . .	14 —	945 —
— de positivo. . . .	14 —	989 —
— de expresion. . .	16 —	1072 —

El teclado de pedal llega de *do* á *fa* y comprende 30 notas; y cada teclado se extiende de *do* á *sol*, teniendo 56 notas; en junto, 86 juegos, 5,246 tubos, más 12 registros y 22 pedales de combinacion.

Aun cuando el órgano de San Sulpicio no aventaja al de Nuestra Señora en cuanto á la perfeccion de su construccion y su sonoridad, es superior á él por el número de juegos, que no baja de 100, sin contar 10 registros y 20 pedales de combinacion, teniendo además 7,000 tubos. El célebre organista aleman Hesse se expresa en estos términos al tratar del órgano de San Sulpicio:

«El sonido del órgano es lleno y gigantesco; yo he tocado algunas piezas con 100 registros de extraordinario vigor. La armonía es de la mayor pureza, y el viento de perfecta igualdad. Los 29 juegos de lengüeta son hermosos y brillantes: resuenan con tal prontitud que se puede tocar con ellos hasta semifusas. La bombarda, que tiene 32 piés, se compone de enormes tubos de estaño con largas embocaduras; resuena tan fácilmente como las cuerdas de un violoncelo. Debo declarar que de cuantos instrumentos he visto, examinado y tocado, el de

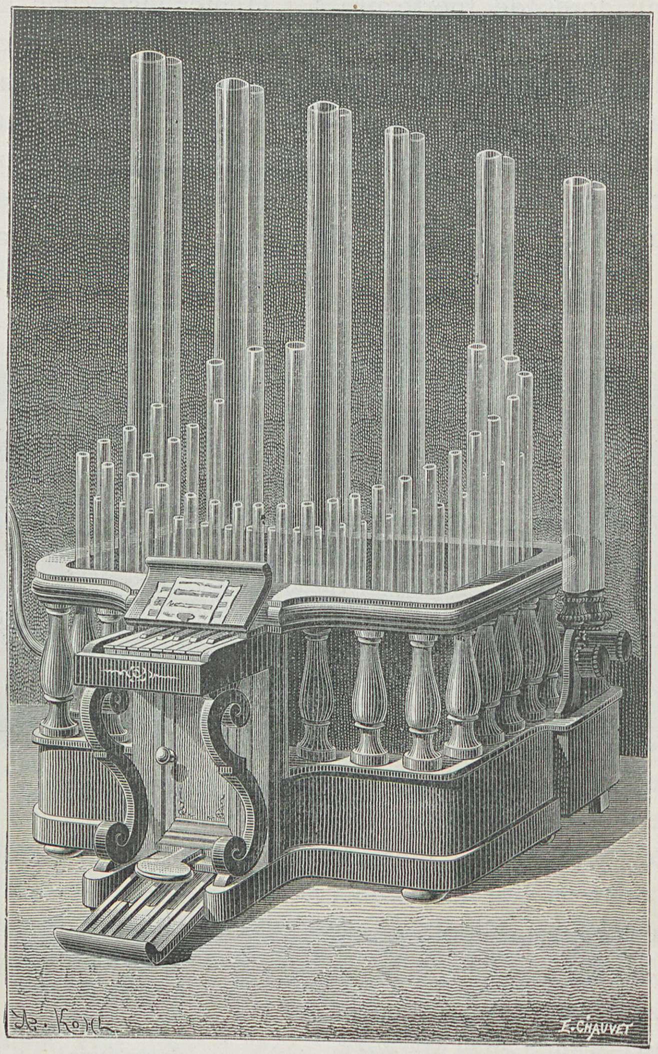


Fig. 417. — Pirófono de M. F. Kastner

San Sulpicio es el más armonioso, grande y perfecto, y en realidad la obra maestra de la moderna construccion de órganos.»

Los curiosos experimentos de las llamas cantantes, que hemos descrito en un capítulo anterior, han sugerido á M. Kastner la idea de construir un órgano de un género enteramente nuevo al cual ha dado su inventor el nombre de *pirófono.*

En cada uno de los tubos de cristal de que se compone este nuevo instrumento de música, hay dos ó varios mecheros de gas hidrógeno cuyas llamas se confunden cuando el tubo no resuena. Para hacerle resonar, basta bajar la tecla correspondiente del teclado del pirófono; por un mecanismo muy sencillo, el movimiento de la tecla se comunica á los mecheros, y las llamas que estaban en contacto, se separan. Al punto se produce el sonido: el tubo canta. Pero tan luego como el dedo del músico deja de pisar la tecla, las llamas se reunen y el sonido cesa inmediatamente.

La experiencia ha demostrado á M. Kastner que se deben colocar las llamas en el tercio de la altura de la base inferior de los tubos, condicion indispensable para que los fenómenos de interferencia produzcan ó hagan cesar instantáneamente el sonido. En un principio se creyó que el gas hidrógeno era preciso en absoluto

para que funcionase el pirófono; pero á consecuencia de nuevos ensayos se ha visto que se podia utilizar el gas del alumbrado, con la condicion de aumentar el número de llamas de cada tubo.

Los sonidos del pirófono son de un timbre particular, que tiene cierta analogía con el de la voz humana.

Terminaremos lo que teníamos que decir acerca de los instrumentos de viento, limitándonos á hacer mencion del *órgano de cilindro*, conocido con el nombre vulgar de *organillo*, y cuyo inventor fué el constructor Barberi de Módena. Dando vueltas á un manubrio, se hace girar un cilindro provisto de púas más ó ménos largas, que bajan las teclas de un teclado. A estas teclas corresponde un mecanismo que hace funcionar una serie de tubos que, puestos en vibracion por el aire de un fuelle, resuenan y pueden reproducir así una pieza musical.

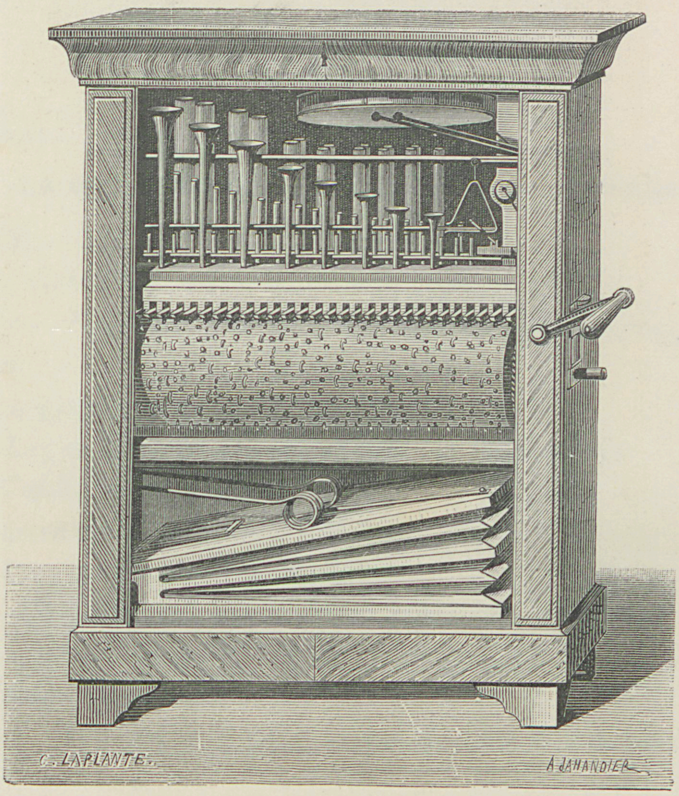


Fig. 418.—Organillo de cilindro

Además de los organillos portátiles que continuamente vemos por las calles á cuestas de algunos infelices, los hay de mayores dimensiones que requieren un carreton para su trasporte, como el representado en la fig. 417. Estos instrumentos valen poca cosa por lo que respecta á la perfeccion de los sonidos, y la música que tocan no es siempre muy agradable para los oídos de los aficionados; pero sirven para popularizar en la ciudad y en el campo los mejores temas de los compositores, como overturas, marchas de óperas, arias, etc., por cuyo concepto son dignos ciertamente de mencion especial.

FIN DEL TOMO PRIMERO

ÍNDICE

DE LOS CAPÍTULOS DEL TOMO PRIMERO

Páginas

INTRODUCCION GENERAL. I

LA GRAVEDAD Y LA GRAVITACION UNIVERSAL

PRIMERA PARTE.—Los fenómenos y sus leyes. I

LIBRO PRIMERO.—La Gravedad. 3

Capítulo primero.—Nociones preliminares sobre las propiedades generales de los cuerpos. 3

Capítulo II.—La gravedad en la superficie de la Tierra. 23

Capítulo III.—Leyes de la gravedad.—Caida de los cuerpos. . . . 32

Capítulo IV.—Caida de los graves.. 39

Capítulo V.—Leyes de la gravedad.—El péndulo. 47

Capítulo VI.—La gravedad en los líquidos. 52

Capítulo VII.—Gravedad del aire y de los gases. 64

Capítulo VIII.—Gravedad del aire y de los gases *(continuacion).* . . 75

LIBRO SEGUNDO.—La Gravitacion. 89

Capítulo primero.—La gravedad en la superficie y en el interior del globo terrestre. 89

Capítulo II.—Densidad de la Tierra. 100

Capítulo III.—Movimiento de los proyectiles.. 107

Capítulo IV.—La gravitacion universal. 113

Capítulo V.—Perturbaciones planetarias.. 124

Capítulo VI.—Las mareas. 137

Capítulo VII.—Masas de los cuerpos celestes.. 152

Capítulo VIII.—¿Qué es la gravitacion?. 163

SEGUNDA PARTE.—Aplicaciones de la gravedad á las ciencias, á la industria y á las artes.. 167

Capítulo primero.—Direccion de la gravedad.—Caida de los cuerpos.—Oscilaciones del péndulo. 169

Capítulo II.—Medicion del peso de los cuerpos.—La balanza.. . . 176

Capítulo III.—La prensa hidráulica.—Los pozos artesianos. . . . 193

Capítulo IV.—Las bombas. 200

Capítulo V.—La presion atmosférica empleada como fuerza motriz. . . 209

Capítulo VI.—Telegrafía neumática.—Relojería neumática. . . . 223

Capítulo VII.—Los globos.—La navegacion aérea.. 234

Capítulo VIII.—La navegacion aérea aplicada al arte militar y á los estudios meteorológicos. 242

EL SONIDO

	Páginas
PRIMERA PARTE.—Los fenómenos y las leyes del sonido.	249
Capítulo primero.—Produccion y propagacion del sonido..	250
Capítulo II.—La velocidad del sonido.	259
Capítulo III.—Reflexion y refraccion sonoras..	273
Capítulo IV.—Propiedades distintivas de los sonidos.	280
Capítulo V.—Las vibraciones sonoras.	289
Capítulo VI.—Las vibraciones sonoras *(continuacion).*	303
Capítulo VII.—Leyes de las vibraciones sonoras en las cuerdas, tubos y placas..	317
Capítulo VIII.—Acústica musical.	326
Capítulo IX.—El oído y la voz.	348
SEGUNDA PARTE.—Acústica.—Aplicacion de los fenómenos y de las leyes del sonido.	353
Capítulo primero.—La telefonía.	353
Capítulo II.—Los instrumentos de música.—Instrumentos simples..	362
Capítulo III.—Los instrumentos de cuerda.	371
Capítulo IV.—Los instrumentos de viento.	383
Capítulo V.—El órgano..	390

EL MUNDO FISICO

1